# RÉACTIONS

DE LA

# MATIÈRE VIVANTE

## ET NON VIVANTE

PAR

Sir JAGADIS CHUNDER BOSE
(A.A.; D.Sc.; L.L.D.; F.R.S.; C.S.I.; C.I.E.)

TRADUIT

Par Édouard MONOD-HERZEN

GAUTHIER-VILLARS et Cie, Imprimeurs-Éditeurs
55, Quai des Grands-Augustins, 55. — PARIS (6e)
1926

IRRI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

# RÉACTIONS DE LA MATIÈRE VIVANTE ET NON VIVANTE

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

# DU MÊME AUTEUR

*Éditions anglaises :*

**Response in the living and non living.**

**Plant response as a means of physiological investigation.**

**Comparative Electrophysiology** (1re édition).

**Researches en the irritability of plants.**

**Life movements of plants** (Transactions of the Bose Research Institute. Calcutta. 3 v.).

**The physiology of the ascent of sap.**

**The physiology of the photosynthesis.**

**The nervous mechanism of plantes.**

**The mecanism of plant response** *(sous presse)*.

GAUTHIER-VILLARS ET Cie

*Éditions françaises :*

**Réactions de la matière vivante et non vivante,** traduit par Édouard Monod-Herzen.

**Électrophysiologie comparée** (nouvelle édition, entièrement remaniée), traduit par P. Lehmann.

**Physiologie de l'ascension de la sève,** traduit par M. Deniker, préface de M. Mangin.

**Physiologie de la Photosynthèse,** traduit par M. Dufrénoy, préface de M. Mangin.

BCU IASI CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

577,3 (02.064)=40

# RÉACTIONS

DE LA

# MATIÈRE VIVANTE

## ET NON VIVANTE

PAR

**Sir JAGADIS CHUNDER BOSE**
(A.A.; D.Sc.; L.L.D.; F.R.S.; C.S.I.; C.I.E.)

TRADUIT

**Par Édouard MONOD-HERZEN**

170209
B.C.U. - IASI
[illegible] IUN 1985

GAUTHIER-VILLARS et Cie, Imprimeurs-Éditeurs
55, Quai des Grands-Augustins, 55. — PARIS (6e)
1926

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BIBLIOTECA DE BIOLOGIE

# PRÉFACE.

Cet Ouvrage présente, liés et complétés, des résultats dont certains ont été publiés dans les recueils suivants :

— De la généralité des phénomènes moléculaires produits par l'électricité sur la matière inorganique et sur la matière vivante (*Travaux du Congrès international de Physique*, 1900).

— Sur la similitude des effets produits par un excitant électrique sur les substances inorganiques et vivantes (*Report Bradford Meeting British Association*, 1900; *Electrician*).

— Réactions à un excitant, présentées par la matière inorganique (Friday Evening Discourse, Royal Institution, may, 1911).

— Sur les réactions électriques des substances inorganiques. Note préliminaire (Royal Society, june 1901).

— Sur les réactions électriques à des excitants mécaniques présentées par les plantes ordinaires (*Journal Linnean Society*, 1902).

— Sur la réaction électrique dans les métaux, les tissus animaux et végétaux (Société de Physique, Paris, 1902).

— Sur l'onde électromotrice accompagnant une perturbation mécanique dans les métaux en contact avec un électrolyte (*Proceedings Royal Society*, vol. LXX).

BCU LAUSANNE CENTRALE UNIVERSITY LIBRARY

— Sur la théorie de la déformation dans la vision et dans l'action photographique (*Journal Royal Photographic Society*, vol. XXVI).

Ces recherches ont été entreprises dans l'Inde, et je saisis l'occasion d'exprimer ma reconnaissance aux Administrateurs de la « Royal Institution », qui m'ont donné la facilité de compléter mes travaux au Laboratoire Davy-Faraday.

J. C. Bose.

Laboratoire Davy-Faraday, « Royal Institution », Londres, mai 1902.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

# TABLE DES MATIÈRES.

## CHAPITRE I.

### RÉACTIONS MÉCANIQUES DES MATIÈRES VIVANTES.

Pages.

Réactions mécaniques. — Diverses sortes d'excitants. — Myographe. — Éléments caractéristiques des courbes de réaction : durée, amplitude, forme. — Modifications des courbes de réaction..... 1

## CHAPITRE II.

### RÉACTIONS ÉLECTRIQUES.

Conditions pour obtenir les réactions électriques. — Méthode de la lésion. — Courant de lésion. — Extrémité lésée : cuproïde; intacte : zincoïde. — Dans le nerf, courant de réaction allant de la région plus excitée à la région moins excitée. — Difficultés de la terminologie actuelle. — Enregistreur électrique. — Deux types de réactions : positives et négatives. — La méthode de la réaction électrique est toujours applicable. — Les réactions électriques sont une mesure de l'activité physiologique. — Réactions électriques des plantes..... 5

## CHAPITRE III.

### RÉACTIONS ÉLECTRIQUES DES PLANTES. MÉTHODE DE LA VARIATION NÉGATIVE.

Variation négative. — Enregistreur de réaction. — Enregistreur photographique. — Montage en opposition. — Moyen de graduer les intensités de l'excitant. — Percussion.

BCU LAUSANNE CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Pages.

— Vibration de torsion. — L'intensité de l'excitant dépend de l'amplitude de la vibration de torsion. — L'efficacité d'un excitant dépend aussi de sa soudaineté..... 17

CHAPITRE IV.

RÉACTIONS ÉLECTRIQUES DES PLANTES.
MÉTHODE D'ARRÊT OU MÉTHODE DU « BLOCK ».

Méthode d'arrêt ou du « block ». — Avantages de la méthode du « block ». — Les réactions électriques des plantes sont « physiologiques ». — Abolition des réactions par les anesthésiques et par les toxiques. — Abolition des réactions lorsque la plante est tuée par l'eau chaude..... 28

CHAPITRE V.

RÉACTIONS DES PLANTES. ACTION D'UN EXCITANT ISOLÉ ET D'EXCITANTS « SUPERPOSÉS ».

Action d'un excitant isolé. — Excitants superposés. — Effets d'addition. — Réactions successives d'amplitude croissante. — Fatigue. — Si les excitants sont assez espacés dans le temps, aucune fatigue ne survient. — Fatigue apparaissant avec la fréquence croissante des excitants. — Tissu constamment excité, et fatigue..... 36

CHAPITRE VI.

RÉACTIONS DES PLANTES. VARIATIONS A DEUX ALTERNANCES.

Variation à deux alternances. — Effet « second » positif et réactions positives. — Variations électriques radiales..... 47

CHAPITRE VII.

RÉACTIONS DES PLANTES.
RELATION ENTRE L'EXCITANT ET LA RÉACTION.

A excitants croissants, réactions croissantes. — A excitants trop intenses, réactions décroissantes..... 53

BCUJAS / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

## CHAPITRE VIII.

### RÉACTIONS DES PLANTES. INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE.

Pages.

Influence d'une température basse. — Influence d'une température haute. — Détermination du point léthal. — Accroissement des réactions, secondaire à une variation de température. — Mort de la plante par la vapeur bouillante, et abolition des réactions..... 61

## CHAPITRE IX.

### RÉACTIONS DES PLANTES. EFFET DES ANESTHÉSIQUES ET DES TOXIQUES.

L'effet des anesthésiques est un « test » ou critère du caractère vital des réactions. — Effet du chloroforme, du chloral, du formol. — Moyen de rendre les réactions indépendantes de la résistance du tissu. — Avantage de la méthode du « block ». — Influence de la dose..... 73

## CHAPITRE X.

### RÉACTIONS DES MÉTAUX.

Peut-on trouver des réactions aux substances inorganiques ? — Expériences sur l'étain, par la méthode du « block ». — Réactions par la méthode de la dépression. — Réactions par la méthode de l'exaltation..... 82

## CHAPITRE XI.

### RÉACTIONS INORGANIQUES. MODIFICATIONS APPORTÉES AUX APPAREILS POUR ÉTUDIER LES RÉACTIONS DES MÉTAUX.

Conditions pour obtenir des mesures quantitatives. — Modification de la méthode du « block ». — Boîte ou « cellule » à vibration de torsion. — Application de l'excitant. — Graduation de l'intensité de l'excitant. — La réaction électrique est due à une perturbation moléculaire. — Test-expérience. — Boîte ou « cellule » voltaïque, à perturbation moléculaire ..... 93

BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY

## CHAPITRE XII.

RÉACTIONS INORGANIQUES.
MOYENS POUR AVOIR DES RÉSULTATS COMPARABLES.

Pages.

Préparation du fil. — Réactions à des excitants successifs égaux, assez espacés dans le temps pour que chacun d'eux agisse comme s'il était seul..... 101

## CHAPITRE XIII.

RÉACTIONS INORGANIQUES.
MOBILITÉ MOLÉCULAIRE : SON INFLUENCE SUR LES RÉACTIONS.

Inertie moléculaire; ses effets. — Remise en état; son retard par un surmenage antécédent. — Modèle mécanique de la perturbation moléculaire. — Inertie moléculaire, combattue par des applications préalables d'excitants qui hâtent le retour au zéro, ou qui accroissent l'amplitude des réactions. — Influence de la température. — Actions chimiques : modification des temps des réactions (durée de réaction latente, durée du retour au zéro). — Variations à deux alternances..... 105

## CHAPITRE XIV.

RÉACTIONS INORGANIQUES. FATIGUE.
RÉACTIONS SUCCESSIVES
D'AMPLITUDE CROISSANTE. RENVERSEMENT DES RÉACTIONS.

Fatigue des métaux. — Fatigue d'un métal tétanisé. — Réactions successives d'amplitude croissante. — Renversement des réactions des nerfs et des métaux, par modification moléculaire. — Nouveau renversement et retour au sens normal, après tétanisation. — Accroissement de l'amplitude des réactions, après tétanisation..... 119

BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY

## CHAPITRE XV.

### RÉACTIONS INORGANIQUES. RELATION ENTRE EXCITANT ET RÉACTION. EXCITANTS « SUPERPOSÉS ».

Pages.

Relation entre excitant et réaction. — Analogies avec les aimants. — Réactions croissant avec l'accroissement des excitants. — Seuil de la réaction. — Excitants « superposés ». — Hystérésis..... 133

## CHAPITRE XVI.

### RÉACTIONS INORGANIQUES. EFFET DES AGENTS CHIMIQUES.

Effet des agents chimiques sur les réactions des métaux. — Effet des agents stimulants. — Effet des agents déprimants. — Effet des toxiques. — Effets opposés des doses faibles ou élevées..... 141

## CHAPITRE XVII.

### EXCITANT LUMINEUX ET COURANTS RÉTINIENS.

Impression visuelle : théorie chimique; théorie électrique. — Courants rétiniens. — Réactions normales positives. — Réactions inorganiques à un excitant lumineux. — Expérience décisive montrant la réaction électrique provoquée par un excitant lumineux..... 149

## CHAPITRE XVIII.

### RÉACTIONS INORGANIQUES. INFLUENCES EXERCÉES PAR DIVERS AGENTS SUR LES RÉACTIONS A UN EXCITANT LUMINEUX.

Influence de la température — Influence du temps d'exposition. — Relation entre l'intensité lumineuse et l'amplitude des réactions. — Oscillations « secondes ». — Anomalies des réactions : 1° petite réaction préalable négative; 2° renversement des réactions; 3° réaction positive temporaire à l'interruption de la lumière; 4° déclin et renversement.... 158

BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY

## CHAPITRE XIX.

ANALOGIES AVEC LES PHÉNOMÈNES DE LA VISION.

Pages.

Action d'un éclairement bref. — Oscillations « secondes ». — Images « secondes » positives ou négatives (contrastes successifs). — Alternances dans la vision binoculaire. — Influence de l'état physique de l'œil. — Reviviscence des images « secondes ». — Impressions visuelles inconscientes. 169

## CHAPITRE XX.

RÉSUMÉ GÉNÉRAL ET CONCLUSION..... 178

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

# TABLE DES FIGURES.

## ILLUSTRATIONS.


| | | Pages. |
|---|---|---|
| 1. | Enregistreur mécanique | 3 |
| 2. | Dispositif électrique pour déceler la réaction du nerf | 6 |
| 3. | Schéma indiquant l'analogie entre l'extrémité lésée d'un nerf et le cuivre d'un élément voltaïque | 7 |
| 4. | Enregistreur électrique | 11 |
| 5. | Diagrammes simultanés des réactions mécaniques et électriques | 13 |
| 6. | Plantes : variation négative | 19 |
| 7. | Plantes : enregistrement photographique de la variation négative | 20 |
| 8. | Enregistreur de réactions | 21 |
| 9. | Montage en « opposition » | 22 |
| 10. | Ressort percutant | 23 |
| 11. | Appareil à vibration de torsion | 24 |
| 12. | Plante : réactions à des percussions ou à des vibrations de torsion | 25 |
| 13. | Influence de la soudaineté sur l'efficacité d'un excitant | 26 |
| 14. | Méthode du « block » | 29 |
| 15. | Réaction d'une plante entièrement immergée | 31 |
| 16. | Plante : réactions successives d'amplitude constante | 37 |
| 17. | Plante : fusionnement des réactions, par succession rapide des excitants | 37 |
| 18. | Plante : Effet d'addition | 38 |
| 19. | Plante : réactions successives d'amplitude croissante | 39 |
| 20. | Plante : apparition de la fatigue, par abréviation des temps de repos | 41 |
| 21. | Fatigue du céleri | 42 |
| 22. | Fatigue du pétiole d'un chou-fleur | 43 |
| 23. | Fatigue due à un surmenage antécédent | 43 |


BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY

Pages

24. Céleri et muscle : fatigue survenant dans un tissu constamment excité ..... 45
25. Plante : influence du repos sur la dissipation de la fatigue ..... 45
26. Plante : variation à deux alternances ..... 48
27-28. Plante fatiguée : réactions anormales positives, devenant négatives, normales, par un excitant énergique. 50-51
29. Plante : variations électriques radiales ..... 52
30. Muscle ou nerf : diagrammes montrant la relation entre les intensités de l'excitant et l'amplitude des réactions. 54
31. Plantes : réactions accrues par excitants d'intensité croissante (percussions) ..... 55
32. Plantes : réactions accrues par excitants d'intensité croissante (vibrations de torsion) ..... 55
33. Plantes, échantillons frais, échantillons fatigués : réactions à des excitants d'intensité croissante ..... 56
34. Plantes : déclin des réactions à des excitants intenses, dû à une fatigue antérieure du tissu ..... 59
35. « Lilium eucharis », température basse : réaction diminuée ..... 62
36. Lierre, houx, lis : effets différents du froid (diagrammes). 63
37. Plantes : enceinte vitrée pour étudier l'action de la chaleur et des anesthésiques ..... 66
38. Influence de la chaleur sur les réactions des plantes ... 67
39. Plantes : modifications « secondes » dues aux variations de température ..... 68
40. « Lis eucharis » : diagramme des réactions pour une élévation et un abaissement de température ..... 69
41. « Eucharis » : courbe de la variation des réactions, pour une élévation et un abaissement de température .... 69
42. Plante : diagramme de l'abolition des réactions et de la mort, par l'action de la vapeur bouillante ..... 71
43. Nerf : effet du chloroforme sur les réactions ..... 74
44. Carotte : effet du chloroforme sur les réactions ..... 75
45. Plante : effet de l'hydrate de chloral sur les réactions. 76
46. Radis : effet du formol ..... 77
47. Plante : abolition des réactions par application d'hydrate de sodium ..... 79
48. Plantes : effet tonique de petites doses d'un toxique (KOH) ..... 80

BCU LAUSANNE LIBRARY

Pages.

49. Plantes : effet toxique d'une dose plus élevée de KOH. 81
50. Étain : méthode du « block », pour obtenir les réactions. 83
51. Couple Zn-Cu : réaction à un excitant mécanique. 86
52. Métaux : réaction électrique, sans « block », par dépression relative. 89
53. Métaux : méthode de l'exaltation relative. 90
54. Divers cas de réactions positives et négatives. 91
55. Métaux : modifications de la méthode du « block » pour déceler la réaction électrique. 95
56. Réactions égales et opposées données par les deux extrémités d'un fil. 97
57. Boîte ou « cellule » à vibration de torsion : schéma du couvercle. 98
58. Métaux : influence du recuit sur les réactions (accroissement) 102
59. Métaux : réactions électriques successives d'amplitude constante (étain). 103
60. Métaux : persistance d'un effet second. 106
61. Métaux : retour au zéro retardé par un surmenage antécédent. 107
62. Modèle mécanique de la perturbation moléculaire. 108
63-64. Métaux : variations concomitantes de la viscosité ou torpidité moléculaire, de la remise en état (ou retour au zéro) et de l'accroissement de l'amplitude de réactions. 110-111
65. Métaux : influence de la température sur les réactions. 112
66. Métaux : variation à deux alternances. 114
67. Métaux : réactions successives négatives, à deux alternances, et positives. 116
68. Transformation graduelle de réactions négatives en réactions positives, en passant par des réactions intermédiaires, à deux alternances. 117
69. Fatigue d'un muscle. 119
70. Fatigue du platine. 119
71. Fatigue de l'étain. 120
72. Apparition de la fatigue par diminution des repos. 121
73. Métaux : fatigue. 122
74. Muscle et métal : réactions successives d'amplitude croissante. 123

BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY

Pages.

75. Nerf : réactions anormales redevenant normales après une série d'excitants tétanisants ..... 125
76-77. Étain et platine : réactions anormales redevenant normales après une série d'excitants tétanisants... 126
78. Platine : passage progressif de réactions anormales à des réactions normales ..... 128
79. Nerfs : accroissement de l'amplitude des réactions après une série d'excitants tétanisants ..... 129
80-81. Étain et platine : réactions d'amplitude accrue après une série d'excitants tétanisants ..... 129-130
82. Courbe d'aimantation ..... 134
83-84. Étain : diagramme de réactions à des intensités croissantes de l'excitant ..... 135-137
85. Étain : excitants isolément inefficaces devenant efficaces par « superposition » ..... 137
86. Étain : fusionnement complet ou incomplet des réactions ..... 138
87. Étain : cycles des effets maxima, montrant les hystérésis. 140
88. Nerf : réactions abolies par l'application d'un toxique. 141
89. Effet d'un stimulant sur l'étain ..... 143
90. Effet d'un stimulant sur le platine ..... 143
91. Effet déprimant du K Br sur l'étain ..... 144
92. Métaux : abolition des réactions par un toxique ..... 145
93. « Arrêt moléculaire » par l'effet d'un toxique ..... 146
94. Métaux : effets opposés des doses faibles ou élevées .... 148
95. Rétine : réaction à la lumière ..... 151
96. Rétine artificielle : réaction à la lumière ..... 153
97. Expérience décisive montrant la réaction électrique due à un excitant lumineux ..... 154
98. Modifications de la « cellule » photo-sensible ..... 155
99. Réactions d'une rétine de grenouille ..... 156
100. Réactions d'une « cellule » photo-sensible ..... 157
101. Influence de la température sur les réactions à un excitant lumineux ..... 159
102. Influence de la durée de l'application des excitants sur les réactions ..... 160
103. « Cellule » photo-sensible : réactions à des intensités lumineuses croissantes ..... 161
104. Relation entre les intensités lumineuses et les amplitudes des réactions ..... 162

BCU MONTREAL UNIVERSITY LIBRARY

Pages.

105. Oscillations secondes..... 163
106. Rétine de grenouille : sursaut positif, temporaire, des réactions, à l'interruption des éclairements..... 164
107. « Cellule » photo-sensible : sursaut positif, temporaire, des réactions..... 165
108. Déclin des réactions, par des expositions trop prolongées..... 167
109. Diverses réactions secondes (après excitation lumineuse). 168
110. « Cellule » d'argent : réactions secondes à des éclairements brefs..... 170
111. Dessin stéréoscopique, pour montrer les alternances dans la vision binoculaire..... 174
112. Nerf, plante, métal : réactions successives d'amplitude constante..... 181
113. Muscle, plante, métal : fatigue..... 182
114. Muscle, plante, métal : réactions successives d'amplitude croissante..... 182
115. Nerf et métal : réactions accrues après une série d'excitants tétanisants..... 183
116. Nerf et métal : réactions anormales redevenant normales après une série d'excitants tétanisants..... 184
117. Nerf, plante, métal : abolition des réactions, par le même toxique..... 185

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

# RÉACTIONS

DE LA

# MATIÈRE VIVANTE

ET

# NON VIVANTE

---

## CHAPITRE I.

### RÉACTIONS MÉCANIQUES DES MATIÈRES VIVANTES.

Réactions mécaniques. Diverses sortes d'excitants. — Myographe. — Éléments caractéristiques des courbes de réaction : durée, amplitude, forme. — Modifications des courbes de réaction.

Un des effets les plus frappants, produits par une perturbation externe sur certaines matières vivantes, est d'en modifier visiblement la forme. Ainsi, un fragment de muscle, pincé, se contracte. L'action externe qui détermine cette modification est dite *l'excitant*. Le corps capable de réagir est dit *excitable* ou *irritable*. Un excitant met donc un corps dans un état d'excitation, qui se traduit parfois par un *changement de forme*.

**Réaction mécanique à divers excitants.** — La réaction à un excitant se rencontre déjà dans les organismes inférieurs, chez certains rhizopodes amiboïdes, par exemple. Ces petites masses protoplasmiques rampent d'ordinaire allongées. Lors-



BCU Lausanne UNIVERSITY LIBRARY

qu'elles reçoivent un choc, elles se contractent en forme de sphère. Si au lieu d'une action mécanique nous faisons intervenir une solution saline, la contraction survient aussi, comme avant. Et les mêmes effets sont produits encore par un éclairement soudain, par une élévation de température, ou par un choc électrique. Une matière vivante peut ainsi être excitée par un agent mécanique, chimique, thermique, électrique ou lumineux. Le point excité n'est pas le seul à réagir, car l'excitation peut parfois se propager à une grande distance de lui. Toutes les matières vivantes possèdent cette propriété conductrice, mais la présentent à des degrés très divers. Tandis qu'en certains tissus animaux, l'excitation ne gagne, fort lentement, que les régions immédiatement voisines du point excité, en d'autres tissus, les nerfs, par exemple, la propagation est rapide, et atteint des régions éloignées.

Pour étudier les réactions par changement de forme, le mieux est de prendre un fragment de muscle. Lorsqu'on le pince, ou qu'on y fait passer une secousse électrique, il se raccourcit et s'élargit : il réagit en se contractant. Puis, l'excitant cessant d'agir, le muscle se détend et reprend sa forme première.

**Enregistreur à levier.** — Avec un muscle, la réaction motrice est trop rapide pour pouvoir être étudiée en détail par les moyens ordinaires. Alors on emploie un *myographe*, grâce à quoi les modifications musculaires sont automatiquement enregistrées. On obtient ainsi l'inscription de la modification et du retour à l'état premier.

Le muscle est lié à l'une des extrémités d'un levier enregistreur. Lorsqu'il se contracte, le style de l'autre extrémité est dévié, par exemple vers la droite. L'amplitude de la déviation dépend de l'intensité de la contraction. Une bande de papier, plane ou enroulée sur un tambour, se déplace perpendiculairement à la déviation du levier, avec une vitesse constante. Lorsque, l'excitant cessant d'agir, le muscle revient, en se détendant, à sa forme première, le style l'enregistre sur le papier, en regagnant, vers la gauche, sa position initiale.

Une courbe se trouve ainsi tracée, dont la partie ascendante correspond à la contraction, et la partie descendante à la détente, ou « remise en état « ou « retour au zéro » (1) du tissu.

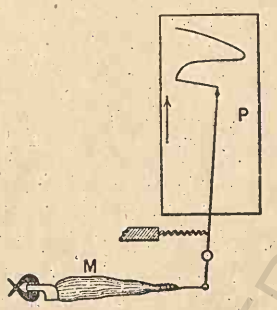



Fig. 1. — *Enregistreur mécanique à levier.*

L'une des extrémités du muscle M, avec son os, est fixée, et l'autre extrémité est attachée à un levier, muni d'un style. Excité, le muscle se contracte, tire sur le levier, et dévie son style, à droite, sur la feuille P, qui se déplace dans le sens de la flèche.

Lorsque cesse la contraction, le levier, avec son style, reprend sa position initiale.

P est la courbe enregistrée.

Les ordonnées de la courbe représentent l'intensité de la réaction, et les abscisses représentent les temps.

**Éléments caractéristiques des courbes de réaction : 1° durée; 2° amplitude; 3° forme.** — Ces courbes de réaction (tout comme celles qui représenteraient une onde sonore) se distinguent les unes des autres par : 1° la durée; 2° l'amplitude; 3° la forme.

La *durée*, ici, dépendant de l'activité fonctionnelle du muscle, est extrêmement variable. Pour la tortue, par exemple, elle peut atteindre la seconde, tandis que pour les muscles moteurs de l'aile de beaucoup d'insectes, elle s'abaisse à $\frac{1}{300}$ de seconde.

(1) Expressions signifiant : retour au *statu quo ante*.

BCU LAUSANNE CANTONAL UNIVERSITY LIBRARY

On pourrait probablement, comme l'a suggéré Hermann, établir pour tout le règne animal une échelle de durée, continue, allant de la contraction, si rapide, des muscles des insectes, à celles des muscles des tortues ou des loirs hibernants (1).

Des exemples de variation dans la *forme* et dans l'*amplitude* des courbes sont donnés par les muscles de la tortue. La réaction du muscle du cou, qui lui sert à rentrer la tête, à l'approche d'un danger, est toute différente de celle du pectoral, qui ne commande qu'à des mouvements lents.

De même, encore, les *modifications* progressives que subit un muscle sont décelées par les changements de forme des courbes correspondantes. Pendant la mort d'un muscle, par exemple, l'amplitude des courbes successives décroît, en même temps qu'elles s'allongent. De nombreuses illustrations seront données plus loin, montrant comment la variation des réactions, accroissement ou dépression, due à divers agents, se traduit par un changement de forme des courbes enregistrées.

Ces diagrammes de contractions nous permettent d'étudier l'effet d'un excitant donné, et la variation de la réaction sous diverses influences extérieures. Mais il y a des tissus où l'effet dû à l'excitant ne peut être perçu visuellement. Pour ceux-ci, il faut employer une méthode toute différente, celle de la *réaction électrique*.

---

(1) BIEDERMANN, *Electrophysiology*, p. 59.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

# CHAPITRE II.

## RÉACTIONS ÉLECTRIQUES.

Conditions pour obtenir les réactions électriques. — Méthode de la lésion. — Courant de lésion. — Extrémité lésée : cuproïde; intacte : zincoïde. — Dans le nerf, courant de réaction allant de la région plus excitée à la région moins excitée. — Difficultés de la terminologie actuelle. — Enregistreur électrique. — Deux types de réactions : positives et négatives. — La méthode de la réaction électrique est toujours applicable. — Les réactions électriques sont une mesure de l'activité physiologique. — Réactions électriques des plantes.

Un fragment de nerf ne se comporte pas comme un muscle, et lorsqu'il est excité mécaniquement ou électriquement, il ne laisse percevoir aucun changement visible. Pourtant, la contraction du muscle qui lui est lié révèle, à la fois, son état d'excitation et la transmission de la perturbation engendrée.

L'effet produit sur un nerf par un excitant peut être mis en évidence par un procédé électrique.

Notons d'abord ceci : Si l'on prend un fragment de nerf, et qu'en deux points de sa surface on dispose des contacts, par deux électrodes impolarisables, A et B, reliées à un galvanomètre, aucun courant ne se manifeste, parce que A et B sont dans des conditions physico-chimiques identiques : les deux points sont isoélectriques.

Pour la même raison, si le nerf est excité, les perturbations seront identiques en A et en B. Si ces perturbations, atteignant A et B quasi simultanément, provoquent, par la suite, une modification électrique quelconque, cette modification sera

BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY

identique aux deux points, et le galvanomètre continuera à

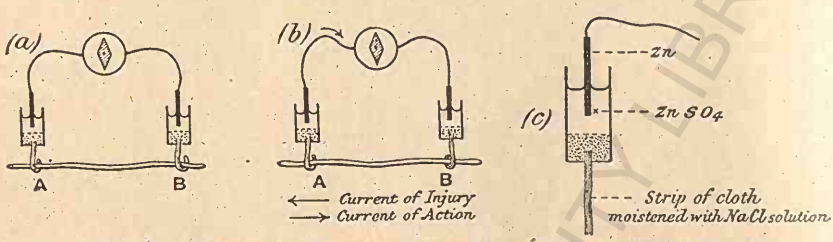



Fig. 2. — *Dispositif électrique pour déceler la réaction du nerf.*

(*a*) Contacts isoélectriques : aucun courant dans le galvanomètre.
(*b*) L'extrémité B est lésée : courant de lésion de B en A. Une excitation donne alors un courant de réaction, de A en B.
(*c*) Électrode non polarisable.

n'accuser aucun courant, Cet effet nul vient de ce que, par raison de symétrie, les actions en A et en B se font équilibre (voir *fig. 2, a*).

**Conditions pour obtenir les réactions électriques.** — Par conséquent, si nous désirons pouvoir déceler une réaction à l'aide du galvanomètre, nous devrons d'abord détruire cet équilibre, et, pour cela, altérer ou abolir, d'une manière plus ou moins durable, les réactions de l'un des points considérés, B par exemple. Dans ces conditions, un excitant provoquera au point le plus excitable, A, une perturbation électrique plus grande et le galvanomètre indiquera un courant de réaction.

Pour rendre B moins sensible, on peut le léser par un sectionnement, par une brûlure, ou par l'application d'un agent chimique énergique.

**Courant de lésion.** — Nous reviendrons sur la question de la réaction électrique, mais il est d'abord nécessaire de dire deux mots de la perturbation électrique causée par la lésion même.

Les conditions physico-chimiques, en A intact, et en B lésé, n'étant plus les mêmes, les conditions électriques ont varié

aussi. Les deux régions ne sont plus isoélectriques. Il y a, entre elles, plus ou moins permanente, ou résiduelle, une certaine différence de potentiel. Et, en effet, un courant, courant de lésion, parcourt maintenant *le nerf*, en allant du point lésé au point intact, et, retourne, par les contacts électrolytiques et le galvanomètre, du point intact au point lésé.

Tant qu'aucune perturbation nouvelle n'intervient, ce courant de lésion demeure à peu près constant (et, à cause de cela, se trouve parfois dénommé : *courant de repos*).

Ainsi, un fragment de tissu vivant, inégalement lésé en ses deux extrémités, fonctionne comme un élément voltaïque et est comparable à un couple cuivre-zinc.

Pour savoir si l'extrémité lésée est comparable au cuivre ou au zinc de ce couple, et pour éviter toute erreur possible, il est désirable d'examiner la chose avec quelque détail.

Prenons deux tiges, l'une de zinc et l'autre de cuivre,

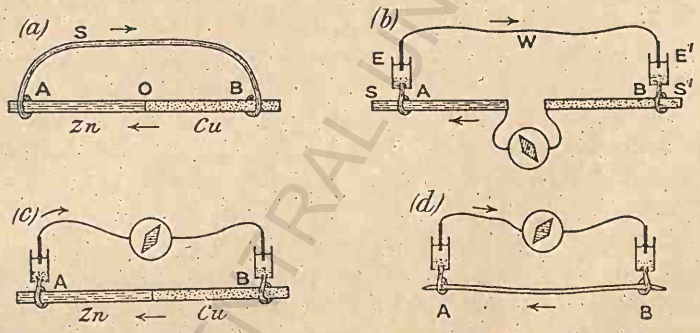



Fig. 3. — *Schémas indiquant comment l'extrémité lésée*, B, *d'un nerf, correspond au cuivre d'un couple voltaïque, et l'extrémité non lésée*, A, *au zinc.*

La comparaison entre (*c*) et (*d*) montre que le point lésé B, de (*d*), correspond au cuivre de (*c*).

plaçons-les en contact fixe, en O (*fig.* 3, *a*), et relions les points A et B par une petite bande d'étoffe S, trempée dans de l'eau salée. Nous avons ainsi constitué un couple voltaïque, et un

courant circule, dans les tiges, de B en A, et retourne, par l'électrolyte S, de A en B.

Maintenant, au lieu de relier A et B par une simple bande d'étoffe S, on peut les relier par deux petites bandes S et S′, et deux électrodes impolarisables E, E′, réunies par un fil W (*fig.* 3, *b*). Électriquement, rien n'est changé, et le même courant circule, dans les tiges, de B en A, et revient, par les électrodes, de A en W et en B. Ceci peut se voir facilement à l'aide d'un galvanomètre, qu'on interpose d'abord en O, et ensuite en W : en O, l'aiguille du galvanomètre est déviée de droite à gauche, indiquant le sens du courant : de B en A; et en W, l'aiguille du galvanomètre est déviée en sens inverse, indiquant un courant de sens inverse $\overrightarrow{AB}$ (*fig.* 3, *c*). Dans ce dernier cas, on notera que lorsque l'aiguille du galvanomètre est ainsi déviée de *gauche à droite*, le métal qui lui est relié à *gauche* est le *zinc*.

Cela posé, passons de là au schéma *d* (*fig.* 3), qui n'est autre, précisément, que le schéma *b* de la figure précédente (2) et où AB est un fragment de nerf, dont l'extrémité B est lésée : le courant qui, par les électrodes impolarisables, va dans le galvanomètre circule de gauche à droite. A cet égard, l'extrémité intacte du nerf, A, est donc comparable au Zn d'un couple voltaïque, est « zincoïde », et l'extrémité lésée B est « cuproïde », ou comparable au Cu (1).

Notons enfin que si, dans le couple voltaïque (*fig.* 3, *c*), l'état électrique du Zn est modifié (et je montrerai plus loin que ceci peut être produit par un changement moléculaire), il en résultera, *ipso facto*, une variation pour la différence de potentiel entre A et B. Par exemple, si, dans cette modification, l'état électrique de A tend à se rapprocher de celui de B (tend vers celui de B), la différence de potentiel entre A et B décroît,

(1) En partant de la supposition *erronée* inverse, que l'extrémité lésée est comparable à Zn, on est conduit à des inductions tout à fait fausses. C'est ce que l'on trouve dans certains Manuels de Physiologie.

BIBLIOTECA DE BIOLOGIE



et le courant qui passe dans le circuit diminue : il subit une variation *négative* (1).

**Courant de réaction.** — Nous avons vu qu'un courant de lésion (parfois dénommé « courant de repos ») passe dans le nerf, de la région lésée à la région intacte ; et que la région lésée B est devenue moins sensible que la région intacte A. Si maintenant le nerf entier reçoit une excitation, l'effet produit, étant plus grand en A qu'en B, réduira la différence de potentiel entre eux, et le courant de lésion diminuera. Pendant une excitation, un nerf accuse donc une variation électrique négative.

On peut exprimer ceci d'une autre manière, et dire que l'excitant a déterminé un *courant de réaction* (2), de sens inverse au courant de lésion (*fig. 2, b*).

Dans un nerf, le courant de réaction *va de la région plus excitée vers la région moins excitée.*

**Difficultés de la terminologie actuelle.** — Nous verrons plus loin le moyen d'obtenir un courant de réaction, sans courant de lésion préalable. Alors « variation négative » perd sa signification.

Il arrive aussi [*voir* note (1), p. 12] qu'un courant de lésion a un sens différent de celui que nous avons noté.

Dans ces conditions, il est nécessaire de convenir d'autres expressions pour désigner le sens du courant *de réaction.*

Sans nous écarter de l'ancienne terminologie, nous pourrons appeler *négatif* un courant qui va du point plus excité au point moins excité.

---

(1) En effet, lorsqu'une quantité variable $y$ passe d'une valeur $y_0$ à une valeur $y_1$, sa *variation* est, *par définition*, représentée par l'expression $y_1 - y_0$. Si, comme ici, $y$ décroît, on a $y_1 < y_0$, et, par conséquent : $y_1 - y_0 < 0$, ou : la variation de $y$ est *négative*. (*N. d. T.*)

(2) Dans les figures 2, 4, 6, on trouvera « courant d'action », certains auteurs employant aussi cette dernière expression.

BCU LAUSANNE - ALMA MATER LIBRARY

Ou, en nous rappelant qu'un contact non lésé joue le rôle du Zn d'un couple voltaïque, nous pourrons l'appeler « zincoïde »; et au contraire appeler « cuproïde » le contact lésé. Et l'on dira que l'excitation d'un point intact, faisant tendre son état vers celui du point lésé, provoque une modification cuproïde.

Ainsi, pour désigner la modification électrique produite, dans un nerf normal, par une excitation, on pourra dire :

Que l'excitation détermine une variation négative;

Ou qu'un courant de réaction va du point plus excité au point moins excité;

Ou que l'excitation provoque une modification cuproïde.

L'excitation, ou perturbation moléculaire, due à l'excitant, est donc accompagnée d'une expression électrique.

Lorsque l'excitant cesse d'agir, et que le tissu revient à son état premier, le courant de réaction tend graduellement vers zéro (1).

Le mouvement de l'aiguille du galvanomètre, pendant l'appli-

---

(1) « L'excitant est capable de produire, dans le nerf, une modification moléculaire, qui constitue l'état d'excitation, accompagné de modifications électriques, qui en sont les phénomènes physiques concomitants certains.

» L'état d'excitation se manifeste, dans le nerf, par une variation électromotrice, et autant que nous le sachions, par elle seulement. La conception d'un tissu vivant excitable, tel que le nerf, implique celle d'un état moléculaire en équilibre stable. Cet équilibre peut être aisément détruit par un agent extérieur, l'excitant, mais le terme de « stable » exprime le fait qu'à tout changement dans une direction donnée succède un changement dans la direction inverse, qui est le retour de la matière vivante à son état premier. Ainsi, dans l'expression électrique d'un état d'excitation, la durée dépend du temps pendant lequel l'excitant a pu distraire la matière vivante de son équilibre, et la maintenir en de nouvelles conditions; et si ceci est très bref, la remise en état du tissu est elle-même très brève. »

(SCHÄFER, *Traité de Physiologie*, p. 453.)

cation de l'excitant, indique la perturbation moléculaire, et le retour graduel de l'aiguille, au zéro, indique la « remise en état » moléculaire.

Cette *variation* électrique temporaire constitue la *réaction* du tissu considéré, et son amplitude est fonction du degré de l'excitant.

**Enregistreur électrique.** — Nous avons donc un moyen

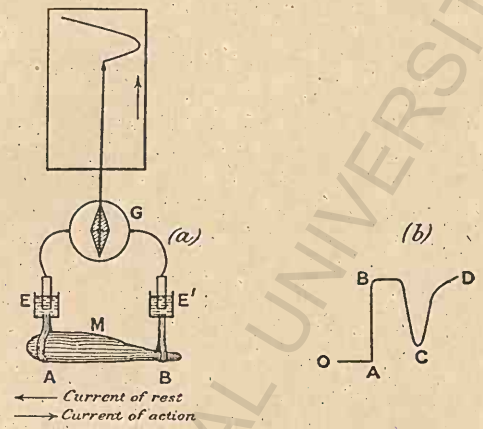



Fig. 4. — *Enregistreur électrique.*

(*a*) M, muscle; A, bout intact; B, extrémité lésée; E, E', électrodes non polarisables reliant A et B au galvanomètre G. Une excitation détermine une *variation négative* du courant de repos (ou courant de réaction). Une plume, liée à l'aiguille du galvanomètre, inscrit son mouvement sur une bande de papier qui se déplace perpendiculairement à lui. En fait, on se sert du spot du galvanomètre, tombant sur une plaque photographique. En (*a*), la partie ascendante de la courbe indique l'effet dû à l'excitant, et la partie descendante indique le début de la remise en état.

(*b*) O est le zéro du galvanomètre. La lésion de B donne la déviation AB. Une excitation la réduit jusqu'en C. CD traduit la remise en état.

d'obtenir électriquement les courbes de réaction. A vrai dire,

ce procédé n'est point d'essence différente du procédé mécanique. Le levier, ici, sera l'aiguille du galvanomètre (*fig.* 4, *a*) déviée par le courant de réaction, exactement comme le levier mécanique était dévié par la contraction du muscle.

Le diagramme (*fig.* 4, *b*), joint au schéma, indique comment, par application de l'excitant, le courant de repos diminue; et comment, à la cessation de l'excitant, la remise graduelle en état se voit par le retour de l'aiguille du galvanomètre à sa position initiale, ou zéro.

**Deux types de réactions : positive et négative.** — Nous devons faire la remarque suivante.

En général, un excitant provoque une diminution du courant de repos, ou variation négative, par exemple, dans les muscles et dans les nerfs. Mais, dans certains cas, on voit le contraire, c'est-à-dire une augmentation, ou variation positive. Telles sont les réactions de la rétine, à la lumière.

On voit aussi parfois un tissu, qui, normalement, présente des variations négatives, donner, après certaines modifications moléculaires, des variations positives. Ainsi, le Dr Waller a trouvé que, tandis que les nerfs à l'état frais présentent toujours des variations négatives, ils en ont de positives à l'état de fatigue; et que la rétine, inversement, a des variations normales positives, et des variations négatives lorsqu'elle est fatiguée.

De sorte que les deux types de réaction se dessinent comme il suit :

I. *Variations négatives* : Courant de réaction allant du point plus excité au point moins excité. Au point plus excité, modification cuproïde. Exemples : muscle et nerf frais; rétine fatiguée (1).

(1) Il faut noter ici brièvement qu'une complication pourrait survenir si l'on considérait le courant de lésion comme un courant de référence par rapport à quoi l'on conviendrait de définir le signe du courant de réaction. En effet, si le courant de lésion avait *toujours* le même sens (du point lésé au point intact), aucune incertitude ne pourrait naître. Mais il arrive souvent (pour la

II. *Variations positives :* Courant de réaction allant du point moins excité au point plus excité. Au point plus excité, modification zincoïde. Exemples : nerf fatigué; rétine fraîche.

De tout ce qui précède, il résulte que le fait essentiel est l'existence d'une réaction électrique de la matière vivante. Le signe + ou — est d'importance secondaire.

**La méthode de la réaction électrique est toujours applicable.** — La méthode de la réaction électrique est applicable à *tous* les tissus vivants.

Si un tissu, tel que le muscle, possède aussi une réaction

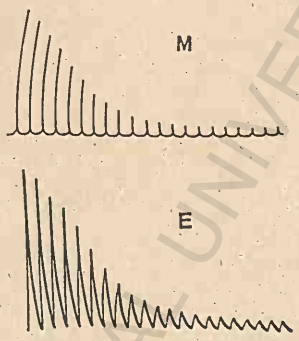



Fig. 5. — *Diagrammes simultanés des réactions mécaniques* M *et électriques* E *d'un muscle de grenouille* (WALLER).

d'ordre mécanique, les deux diagrammes, électrique et mécanique, sont pratiquement identiques. Ceci ressort clairement de la figure 5, qui donne, pour un même muscle, les courbes de réaction des deux espèces, prises simultanément.

---

rétine, par exemple) que le sens du courant de lésion subisse un renversement, ou soit renversé dès son début, c'est-à-dire que le courant chemine en sens inverse, du point intact au point lésé. De sorte que des confusions pourraient s'ensuivre. Mais aucune erreur n'est plus possible en convenant d'appeler *positif* le courant de réaction allant *vers* le point le *plus* excité, et *négatif* celui allant *vers* le point le *moins* excité.

Ainsi nous voyons que la réaction électrique peut non seulement remplacer la réaction mécanique, mais qu'elle a, de plus, l'avantage de pouvoir être obtenue lorsque cette dernière fait défaut.

**Les réactions électriques sont une mesure de l'activité physiologique.** — On peut considérer ces manifestations électriques comme physiologiques, ou caractéristiques des tissus vivants, car tout ce qui augmente l'activité physiologique, accroît, de même, *pari passu*, l'intensité des manifestations électriques. Inversement, lorsqu'un tissu est tué par un toxique, ses réactions électriques disparaissent, en même temps que disparaît sa sensibilité. Et les anesthésiques, comme le chloroforme, amenuisent graduellement les réactions électriques et finissent par les abolir.

De l'observation de tous ces faits, certains concluent que le phénomène de la réaction est particulier aux organismes vivants (1), et en déduisent aussitôt qu'il est dû à une force inconnue, hyperphysique, ou « vitale », qui appartient à un domaine dépassant la recherche physique.

Cette exclusion n'est, cependant, peut-être pas légitime, car avant d'avoir examiné l'ensemble des phénomènes physiques, il est certainement impossible d'affirmer que telle classe particulière de phénomènes, est, de par sa nature, étrangère à cet ensemble.

---

(1) « Le signe électrique de la vie... Un muscle isolé donne un signe de vie lorsque, excité, il se contracte... Un nerf ordinaire, normalement relié à ses organes terminaux, donne un signe de vie par son muscle, qui se contracte, par voie directe ou réflexe, lorsque le tronc nerveux est excité. Mais si ce nerf est séparé de ses organes terminaux, et isolé du reste de l'organisme, il ne donne, lorsqu'on l'excite, aucun signe de vie ni chimique, ni thermique, et c'est seulement grâce à une manifestation électrique que nous pouvons savoir s'il est encore vivant ou non. Le signe de vie le plus général et le plus délicat est donc la réaction électrique. »

(WALLER, *Le Cerveau*, 1900, p. 3 et 4.)

BCU LAUSANNE VAUD LIBRARY

**Réactions électriques des plantes.** — Avant de rechercher si ces réactions sont, ou non, dues à quelque propriété physique de la matière, et, par conséquent, peuvent, ou non, être offertes aussi par les corps inorganiques, il sera peut-être bon de voir si des phénomènes parallèles ne peuvent être rencontrés dans le monde intermédiaire des plantes.

Par là, nous passerons, en effet, de l'étude des réactions animales, de grande complexité, à l'étude de réactions obtenues dans des conditions de vie plus simple.

Munck, Burdon-Sanderson, et d'autres, ont trouvé des réactions électriques chez les sensitives. Mais il était intéressant de savoir si ces réactions étaient spéciales à des plantes douées de mouvements aussi remarquables, ou bien si on les trouvait aussi avec des plantes ordinaires, où tout mouvement visible est totalement absent. Dans cette même voie, Kunkel avait déjà observé, pour les plantes ordinaires, des manifestations électriques liées à la flexion des branches [1].

Mon but à moi était d'obtenir, non pas de simples réactions qualitatives, mais plutôt de voir s'il était possible de mettre en évidence, dans toute la série des phénomènes de réaction, un parallélisme entre l'animal et la plante.

Je désirais savoir, en ce qui concerne les plantes : quelle était la relation entre les degrés de l'excitant et l'amplitude des réactions correspondantes; quels étaient les effets de la « superposition » des excitants; quand apparaissait la fatigue, et comment elle influait sur les réactions; quelle serait, sur les réactions, l'influence d'une température extrême; et enfin, si, de même que diverses substances chimiques sont toniques, anesthésiques, ou toxiques pour le nerf et le muscle, il y en avait qui pussent agir ainsi sur les plantes.

Si l'on pouvait prouver que les réactions électriques constituent un indice fidèle de l'activité physiologique des plantes, il deviendrait possible d'aborder avec succès maint problème

---

[1] Kunkel pensait que le phénomène électrique était dû au mouvement de l'eau dans les tissus. On verra que cette explication n'est pas exacte.

de physiologie végétale, dont la solution rencontre de nombreuses difficultés expérimentales.

Avec les tissus animaux, les expériences doivent se poursuivre au travers de nombreuses et inévitables grosses difficultés. Un tissu isolé, par exemple, subit des modifications inconnues, inséparables de l'approche rapide de la mort. A cet égard, les plantes offrent un grand avantage, car leurs tissus conservent leur vitalité intacte pendant un temps très long.

Dans les tissus animaux, les réactions vitales elles-mêmes sont extrêmement complexes, tandis que dans les conditions plus simples de la vie végétale, les facteurs essentiels de la modification des réactions se laissent mieux déterminer.

Dans des Chapitres qui viendront après, nous verrons que les phénomènes de réaction sont présentés non seulement par les plantes, mais aussi par des substances inorganiques, et que les réactions de ces dernières sont modifiées par divers agents, exactement de la même manière que celles des tissus animaux. Pour montrer à quel point ces ressemblances sont frappantes, je mettrai, côte à côte, des réactions obtenues avec des tissus animaux, et celles que j'ai obtenues avec des plantes et avec des substances inorganiques. Pour les tissus animaux, je choisirai les exemples les plus récents et les plus complets, parmi les diagrammes du Dr Waller.

Avant de parvenir, pour les réactions des plantes, à des conclusions satisfaisantes, nous aurons à surmonter bien des difficultés expérimentales. Je vais dire comment ceci a été accompli (1).

(1) Mon préparateur M. J. Bull m'a très efficacement aidé dans mes expériences.

# CHAPITRE III.

## RÉACTIONS ÉLECTRIQUES DES PLANTES. MÉTHODE DE LA VARIATION NÉGATIVE.

Variation négative. — Enregistreur de réaction. — Enregistreur photographique. — Montage en opposition. — Moyen de graduer les intensités de l'excitant. — Percussion. — Vibration de torsion. — L'intensité de l'excitant dépend de l'amplitude de la vibration de torsion. — L'efficacité d'un excitant dépend aussi de sa soudaineté.

Nous montrerons d'abord que, dans les plantes, toute application d'excitant est accompagnée d'une réaction électrique (1).

Dans les expériences ayant pour but de mettre en évidence une réaction électrique, il vaut mieux ne pas se servir d'un excitant électrique, afin d'être certain que la réaction observée est entièrement due à l'excitant, et n'est pas (dans le cas où l'excitant serait électrique) une dérivation du courant envoyé dans le tissu. C'est pourquoi un excitant mécanique sera le meilleur.

(1) J'ai donné une Note préliminaire sur les réactions électriques des plantes à la fin de ma communication sur « La réaction électrique des substances inorganiques » lue à la Royal Society, le 6 juin 1901, et aussi à l'un des vendredis soirs de la Royal Institution, le 10 mai 1901. Une contribution plus importante a été apportée par la communication sur « La réaction électrique des plantes communes à un excitant mécanique » lue à la Linnean Society, le 20 mars 1902.

Je remercie la Royal Society et la Linnean Society de me permettre de reproduire quelques-uns de mes diagrammes figurant à leurs comptes rendus. J.-C. B.

J'ai trouvé que toutes les parties d'une plante vivante ont des réactions électriques plus ou moins grandes. Dans les cas favorables, la différence de potentiel peut aller jusqu'à 0,1 volt.

Il faut toutefois se rappeler que les réactions, étant fonction de l'activité physiologique de la plante, peuvent subir des variations saisonnières. Chaque plante a une saison de réactivité maxima. Les pétioles des feuilles de marronnier, par exemple, ont des réactions assez fortes au printemps et en été, mais qui diminuent aux approches de l'automne. Voici quelques organes dont les réactions sont assez bonnes :

Racines. — Carotte (*Daucus carota*). Radis (*Raphanus sativus*).

Tiges. — Géranium (*Pelargonium*). Vigne (*Vitis vinifera*).

Pétioles. — Marronnier (*Æsculus hippocastanum*). Navet (*Brassica napus*). Choux-fleur (*Brassica oleracea*). Céleri (*Apium graveolens*). Lis Eucharis (*Eucharis amazonica*).

Tiges de fleurs. — Arum (*Richardia africana*).

Fruits. — Aubergine (*Solanum melongena*).

**Variation négative.** — Prenons un pétiole de navet AB, et tuons, à sa surface, une petite aire B, par quelques gouttes de potasse caustique, en laissant l'aire A intacte. On verra qu'un courant parcourt le pétiole allant de B, lésée, en A, intacte, comme dans le cas d'un tissu animal. La différence de potentiel dépend de l'état de la plante, et de la saison où elle a été cueillie. Dans l'expérience ici décrite (*fig.* 6, *a*), cette différence était de 0,13 volt.

On donne alors au pétiole un coup sec, et l'on voit se produire une diminution soudaine du courant, variation négative, de 0,026 volt. Un second coup, plus fort, détermine une seconde réaction, donnant une diminution plus grande, de 0,047 volt (*fig.* 6, *b*).

La figure suivante (*fig.* 7) est un diagramme photographique d'une autre suite de réactions (lire de droite à gauche). Les trois premières réactions correspondent à une même intensité

de l'excitant, et les six suivantes à une intensité double. On notera la fatigue dont témoignent les réactions.

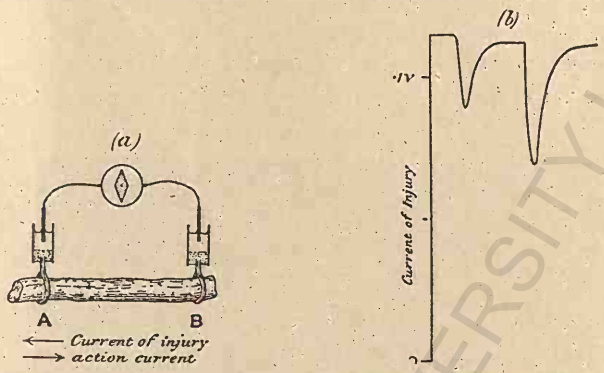



Fig. 6. — (*a*) *Expérience mettant en évidence les réactions électriques des plantes par la méthode de la variation négative.* (*b*) *Réactions, dans le pétiole d'un navet, à deux chocs, dont le second est le plus fort.*

A et B sont des contacts, distants de 2$^{cm}$, et B est lésé. La plante reçoit, comme excitant, un coup sec entre A et B. L'excitation produite agit en A et B. Mais A étant intact, réagit davantage, et l'effet différenciel est une variation négative.

Au Chapitre suivant, seront décrites d'autres expériences, montrant pertinemment que les réactions sont bien un résultat direct de l'excitant, et non d'une circonstance fortuite. Mais nous indiquerons d'abord le dispositif expérimental employé, et la méthode suivie.

**Enregistreur de réaction.** — Nous avons pris un galvanomètre sensible, apériodique, de d'Arsonval. La durée de la déviation de la bobine, dans les conditions de l'expérience, est de 11 secondes environ. Un courant de $10^{-9}$ ampère donne, au spot (1), à 1$^{m}$, un déplacement de 1$^{mm}$.

(1) Le petit miroir du galvanomètre, recevant un rayon lumineux, projette sur un écran une petite tache claire : le spot.

Pour noter les réactions d'une manière rapide et précise, j'ai combiné le dispositif que voici. Les courbes pouvaient être obtenues directement, en marquant les mouvements du spot sur une bande de papier, enroulée sur un tambour, mû par un mouvement d'horlogerie. On peut faire varier la vitesse du tambour, soit par le mouvement d'horlogerie, soit en chan-

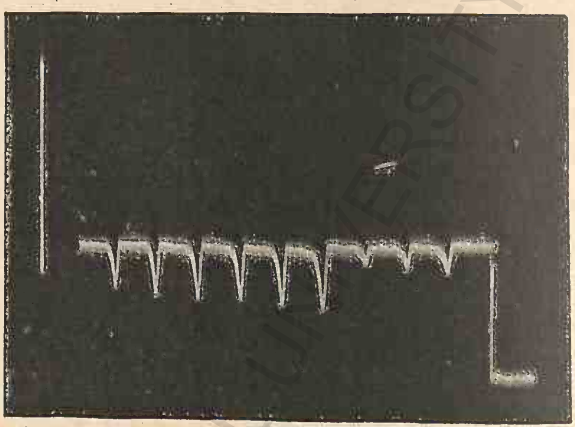


Fig. 7. — *Diagramme des réactions d'une plante (pétiole d'une feuille de chou-fleur), par la méthode de la variation négative.*

De droite à gauche : les trois premières réactions (sommets en bas) correspondent à un courant d'intensité 1 ; les six suivantes, à une intensité double. Les réactions successives trahissent une certaine fatigue.

geant la roue qui l'entraîne. Le spot est envoyé sur le tambour par un miroir incliné, fixé au bâti du tambour. La déviation du spot se fait perpendiculairement au déplacement du papier. Un stylographe, fixé à un chariot, touche juste le papier. Le chariot peut glisser le long d'une tige, parallèle à l'axe du cylindre (*fig.* 8).

Tout le temps que la plante est au repos, le style, coïncidant avec le spot immobile au zéro, trace une droite sur le papier

qui tourne. A l'application d'un excitant, le spot dévie dans une direction perpendiculaire à cette droite, c'est-à-dire parallèle à l'axe du cylindre, et la combinaison de ces deux mouvements donne une trajectoire plus ou moins oblique. En suivant,

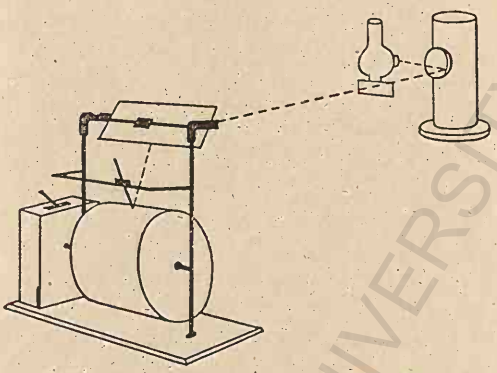


Fig. 8. — *Enregistreur de réactions.*

avec le style, cette excursion du spot, on obtient la première partie de la courbe de réaction. Puis, le spot regagne peu à peu son zéro, et la partie correspondante de la courbe représente la « remise en état ». Les ordonnées représentent les variations de la force électromotrice, et les abscisses représentent les temps.

Pour graduer les déviations du spot, on peut envoyer dans le circuit une force électromotrice connue, et relever la déviation. La vitesse du mouvement d'horlogerie est réglée de manière que le papier parcoure exactement, par exemple, 25$^{mm}$ par minute. Bien entendu, si des expériences particulières le rendent désirable, la vitesse peut être accrue, et atteindre, par minute, 15$^{cm}$.

Ce procédé simple donne des diagrammes très précis. De plus, il permet de voir tout de suite si l'échantillon soumis à l'expérience convient à la recherche proposée. Enfin, il permet d'enregistrer un grand nombre de diagrammes en un temps relativement court.

BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY

**Enregistreur photographique.** — Les diagrammes peuvent aussi être enregistrés photographiquement. Pour cela, c'est un cliché qu'un mouvement d'horlogerie entraîne, et le spot lumineux, tombant sur lui, y enregistre ses déplacements. Tous les diagrammes donnés ici sont les reproductions exactes de ceux obtenus par l'un ou l'autre procédé. Les diagrammes photographiques sont reproduits en blanc sur noir.

**Montage en « opposition ».** — Les réactions étant fonction de la *variation* du courant de lésion, et celui-ci pouvant être

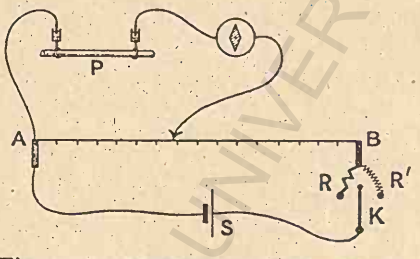



Fig. 9. — *Montage en « opposition ».*

AB est une tige de métal, graduée, avec deux résistances R et R'. S est un accumulateur. Quand le contact K est tourné à droite, une des divisions de l'échelle métallique correspond à 0,001 volt, et à 0,01 volt quand K est tourné à gauche. P est la plante.

intense, le spot peut être envoyé en dehors du champ de l'enregistreur. Alors il est bon de disposer un potentiomètre avec un montage en « opposition », où la force électromotrice due à la lésion soit exactement compensée (*fig.* 9). Les variations électriques dues à l'application de l'excitant sont ensuite recueillies comme il a été dit.

Ce montage en opposition est également utile pour graduer les déviations du galvanomètre, dont nous parlions plus haut.

**Moyen de graduer les intensités de l'excitant.** — Dans les opérations quantitatives, il est nécessaire de pouvoir s'assurer

que l'intensité de l'excitant est constante, ou bien qu'elle varie d'une manière connue.

Deux coups donnés à la main ne pouvant jamais être identiques, j'ai eu recours aux deux dispositifs suivants, qui m'ont donné satisfaction.

**Ressort percutant.** — Cet appareil consiste en un ressort S, encastré à gauche (sur la figure 10), prolongé par une tige R

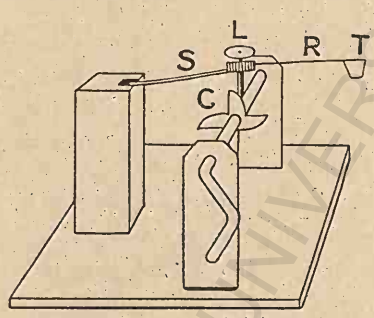



Fig. 10. — *Ressort percutant.*

munie d'une tête de marteau T. Pour soulever le ressort, et le laisser retomber, SR porte un œillet fileté, traversé par une tige filetée L, qui peut descendre plus ou moins bas, et rencontrer une roue à dents C. En tournant la roue, chaque dent soulève la tige L. Quand elle la dépasse, L retombe, et T frappe un coup sec. Grâce à la tige filetée, et à une échelle graduée, on peut mesurer la hauteur de la chute, et, par suite, l'intensité du choc.

On peut augmenter l'intensité du coup en allongeant la tige L, ou en diminuant la longueur de S par une butée. En faisant tourner la roue lentement ou vite, on peut donner des coups isolés, ou une série de coups rapidement répétés.

Le seul inconvénient de l'excitation par percussion est de blesser, à la longue, l'endroit frappé. Les vibrations dont nous allons parler évitent cet inconvénient.

**Percuteur électrique.** — Le précédent, mais mû électriquement.

**Vibration de torsion.** — J'ai trouvé qu'une vibration de torsion était un excitant très efficace. Une tige de plante est

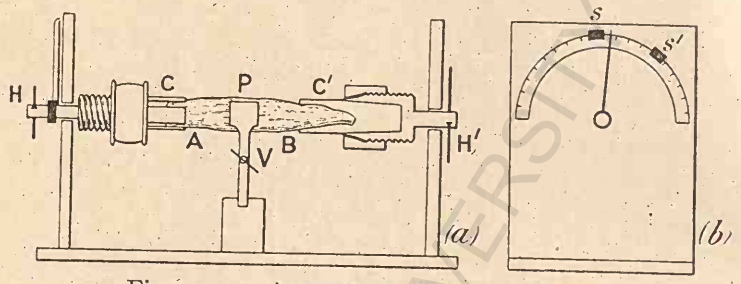



Fig. 11. — *Appareil à vibration de torsion.*

(*a*) La plante P est solidement maintenue, en son milieu, par la pince à vis, V. Les deux extrémités A et B sont saisies par des mors C et C'. Par les poignées H et H', on peut imprimer une vibration de torsion à l'extrémité A, ou à l'extrémité B de la plante.

(*b*) Le schéma (*b*) montre comment l'amplitude de la torsion peut être limitée d'avance par des butées S et S'.

fixée vers son milieu par une pince à vis V. Ses deux extrémités libres A et B sont saisies par des tubes C, C', munis chacun de trois mors. Par la poignée H, on peut imprimer à la tige une rapide vibration de torsion (1). L'amplitude de cette torsion, qui détermine l'intensité de l'excitant, peut être mesurée avec précision par un cercle gradué, et limitée par deux butées S et S' (*fig.* 11).

---

(1) J'entends par là une rapide allée et venue (torsion et détorsion) ou vibration *complète*. En effet, pour que les réactions successives soient comparables, il est essentiel qu'il n'y ait aucune torsion résiduelle, c'est-à-dire qu'à la fin d'une vibration, la plante soit exactement dans le même état qu'au début.

**L'intensité de l'excitant dépend de l'amplitude de la vibration de torsion.** — L'expérience suivante montre que la vibration de torsion est un excitant aussi efficace qu'un choc, et que, pour une tige végétale d'une même longueur, l'intensité de l'excitation croît avec l'amplitude de la torsion. (Bien entendu, si la longueur de la tige était doublée, il faudrait, pour obtenir le même résultat, que l'angle de torsion soit aussi double.)

J'ai fixé dans cet appareil un pétiole de feuille de navet. Puis j'ai enregistré ses réactions à deux percussions successives,

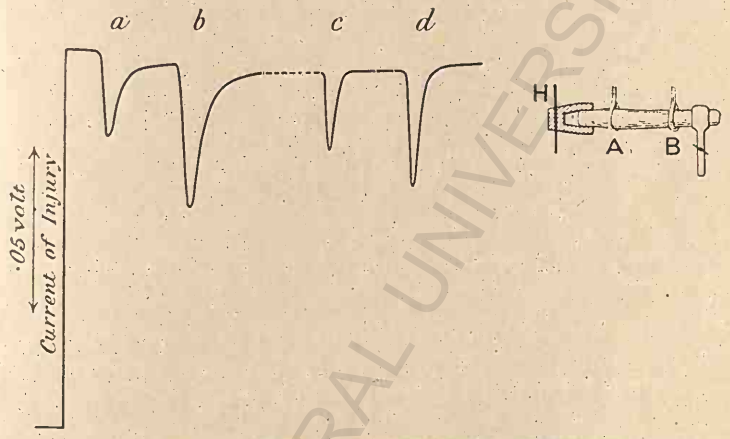



Fig. 12. — *Plante : réactions à des percussions ou à des vibrations de torsion.*

B est l'extrémité lésée.
Une percussion, donnée entre A et B, donne la courbe de réaction *a*.
Une percussion plus forte donne la courbe de réaction *b*.
Par H, on imprime, à la tige, une vibration de torsion d'angle 45° et l'on a la réaction *c*. Une vibration de torsion d'angle 67° donne *d*.

dont l'une était à peu près deux fois plus forte que l'autre. Après quoi, j'appliquai, au même pétiole, deux vibrations de torsion successives, dont l'angle était de 45° et de 67°, respectivement. Les deux couples de résultats sont donnés

figure 12, et l'on y voit que les deux modes d'excitation, percussion ou vibration de torsion, peuvent, avec un égal effet, s'employer indifféremment.

La vibration de torsion a, sur le choc, l'avantage de n'être pas, comme lui, localisée, mais d'intéresser uniformément toute la longueur du tissu étudié.

**L'efficacité d'un excitant dépend aussi de sa soudaineté.** — Pour que les applications successives d'excitants soient également efficaces, il est un autre point à considérer.

Fig. 13. — *Influence de la soudaineté sur l'efficacité d'un excitant.*

Les courbes *a*, *b*, *c*, *d* sont les réactions à des vibrations de torsion, de même amplitude : 30°. En *a*, la vibration était très lente; en *b*, moins lente; elle était rapide en *c*, et très rapide en *d*.

Dans tous les cas d'excitation des tissus vivants, on trouve que l'efficacité d'une excitation dépend de sa soudaineté.

Ainsi, pour un muscle, le choc électrique dû à un courant de « rupture » est, en raison de sa grande rapidité, plus efficace que le choc dû à la « fermeture » du même courant. De même, pour la vibration de torsion, j'ai trouvé que les réactions des plantes dépendent de la rapidité de la vibration. Je donne ici le diagramme correspondant à des excitants successifs, dus à des vibrations de torsion de même amplitude, mais données avec une rapidité croissante (*fig.* 13).

Si donc nous désirons maintenir constante l'intensité efficace d'un excitant, nous devons réunir les deux conditions suivantes :

1° L'amplitude de la vibration doit être constante. Ceci s'obtient par le cercle gradué.

2° La durée de la vibration doit être constante. Avec un peu de pratique, on y arrive aisément.

L'uniformité des excitants permet alors d'avoir toute confiance en l'obtention difficile de données quantitatives, qui seules rendent possible la démonstration rigoureuse des phénomènes que nous étudions.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

# CHAPITRE IV.

## RÉACTIONS ÉLECTRIQUES DES PLANTES. MÉTHODE D'ARRÊT OU MÉTHODE DU « BLOCK ».

Méthode d'arrêt, ou méthode du « block ». — Avantages de la méthode du « block ». — Les réactions électriques des plantes sont « physiologiques ». — Abolition des réactions par les anesthésiques et par les toxiques. — Abolition des réactions lorsque la plante est tuée par l'eau chaude.

**Méthode du « block ».** — J'ai imaginé une autre méthode, indépendante des précédentes, pour étudier les réactions des plantes. Elle nous donne le moyen de vérifier les résultats trouvés par la méthode de la variation négative. Mais surtout elle est, comme nous le verrons plus tard, un mode de recherche perfectionné, qui nous permet de traiter des problèmes qu'il eût été, sans cela, difficile d'aborder.

Lorsque des contacts électrolytiques sont établis en deux aires, non blessées, A et B, d'une tige, les deux points, étant pareils à tous points de vue sont isoélectriques, et un courant infime, ou nul, passe dans le galvanomètre. Si, maintenant, la tige entière reçoit l'action d'un excitant, et que les extrémités A et B soient, au même moment, également excitées, il est clair qu'il ne se manifestera, non plus, aucun courant de réaction, parce qu'il y a équilibre entre les deux points.

Dans la méthode de la variation négative, on avait résolu la difficulté en abaissant l'excitabilité de l'une des extrémités par l'application d'un agent chimique, par une lésion, ou en supprimant même l'excitabilité par une excessive élévation de température. Alors, en excitant la tige, l'excitation était

plus grande en A qu'en B, et un courant de réaction parcourait la tige, allant de l'extrémité plus excitée A vers l'extrémité moins excitée B (*fig.* 6).

Mais une telle dissymétrie peut être obtenue aussi par d'autres moyens. Par exemple, si un dispositif quelconque serre à bloc la région C, entre A et B (*fig.* 14, *a*), empêchant

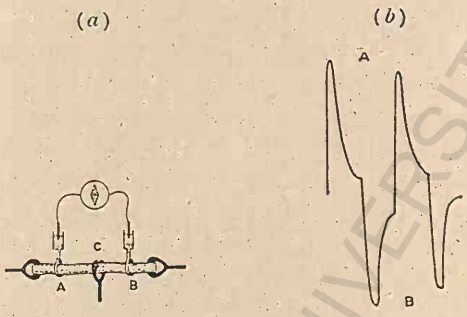



Fig. 14. — *Méthode d'arrêt ou méthode du « block ».*

(*a*) La plante est serrée à bloc en C, entre A et B.
(*b*) Réactions obtenues en excitant alternativement l'une et l'autre extrémité. L'excitation de A produit une réaction ascendante; celle de B, une réaction descendante.

toute perturbation (par coup ou par vibration de torsion), donnée en A, d'atteindre B, A est, *ipso facto*, en plus grande excitabilité que B. Dans ces conditions, en excitant A, un courant de réaction parcourt la tige, de A en B, c'est-à-dire de l'extrémité plus excitée vers l'extrémité moins excitée. Et si l'on excite B, le sens du courant est renversé (*fig.* 14, *b*).

Cette méthode est appelée méthode du « block ».

Elle présente, sur celle de la variation négative, l'avantage de pouvoir toujours vérifier une série de résultats donnés, en faisant l'expérience inverse.

De plus, lorsqu'on lésait l'une des extrémités d'une tige, on la plaçait dans des conditions initiales anormales, différentes de l'état d'intégrité. En outre, des modifications iné-

vitables, survenant avec le temps, affectent inégalement les extrémités lésée et non lésée, et l'expérience est ainsi soumise à des variations inconnues. Au contraire, le serrage à bloc ne lèse rien, la plante reste intacte, et aucun changement physiologique appréciable ne l'affecte, car, dans les plantes, la durée de l'expérience rend ces changements infimes.

**Les réactions électriques des plantes sont physiologiques, ou « vitales ».** — Je vais maintenant démontrer que, quel que soit le mécanisme employé, les réactions des plantes sont de caractère physiologique.

Les recherches décrites dans les Chapitres suivants montrent que les réactions constituent un indice précis de l'activité physiologique. On trouve en effet que, toutes autres choses restant égales, tout ce qui tend à exalter ou à diminuer la vitalité de la plante tend aussi à voir croître ou décroître les réactions électriques. Ces effets électromoteurs sont très nets, et atteignent des valeurs considérables, parfois jusqu'à 0,1 volt, ou plus, comme il a été dit plus haut. Ils sont proportionnels à l'intensité de l'excitant.

Il est à peine besoin d'ajouter que des précautions spéciales sont prises pour éviter tout déplacement ou toute perturbation parasite venant des contacts. Au reste, lorsque les contacts sont établis en des points isoélectriques, et que des excitants répétés engendrent des réactions également répétées, aucune variation des contacts ne peut être invoquée pour les expliquer. Elle ne saurait non plus, rendre compte des renversements successifs des réactions, lorsqu'on excite A, puis B, alternativement.

Ces réactions sont données même par les plantes complètement immergées, comme dans le dispositif expérimental (*fig.* 15). Et dans ce cas, où il n'est pas possible qu'un contact se déplace ou varie, on a, quand même, le courant de réaction habituel.

Je ne décrirai ici que quelques expériences cruciales, pour montrer le caractère physiologique des réactions électriques. Les « tests » ou critères, adoptés par les physiologistes, pour

reconnaître la nature physiologique d'une réaction, consistent à examiner l'action des anesthésiques, des toxiques, et des

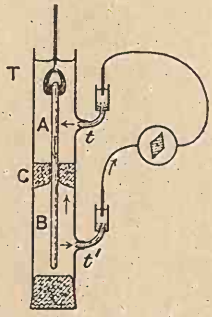



Fig. 15. — *Réactions d'une plante* (*de* A, *excité*, *à* B, *non excité*), *complètement immergée.*

Le milieu d'un pétiole est bloqué par un bouchon de serrage C, dans le tube T rempli d'eau, de sorte que la plante est entièrement immergée. Des mèches humides, reliées aux deux électrodes non polarisables, sont placées dans les tubes latéraux *t*, *t'*. Une des extrémités de la tige est serrée dans une pince en ébonite, et peut recevoir par elle des vibrations. Un courant de réaction passe dans la tige, de l'extrémité excitée A, à l'extrémité non excitée B, et au dehors, par le liquide, retourne de B en A. Cette dernière partie du courant, par les tubes *t* et *t'*, passe dans le galvanomètre, qui dévie.

températures élevées, qui sont connus pour déprimer ou détruire la vitalité. J'appliquerai donc les mêmes « tests » aux réactions des plantes.

**Effet des anesthésiques et des toxiques.** — Les anesthésiques ordinaires, comme le chloroforme et les toxiques, comme le bichlorure de mercure, dépriment profondément, on le sait, l'activité des tissus vivants, ou abolissent même tout indice de réaction. Pour mon expérience, j'ai constitué deux groupes de pétioles, munis de leurs feuilles, tous deux semblables en tous points. Pour faire absorber du chloroforme par le premier

groupe, l'extrémité, coupée, des pétioles était plongée dans de l'eau chloroformée. La transpiration des feuilles aidait à l'absorption. Le second groupe, servant de témoin, a été simplement plongé dans de l'eau ordinaire. La narcose due au chloroforme, avec sa fin mortelle, fut bientôt évidente : les feuilles commencèrent à se faner, la décoloration particulière, symptôme de mort, apparut à la nervure centrale, et s'étendit aux nervures secondaires. Un autre signe apparut. Les pucerons des feuilles moururent avant même l'apparition des taches décolorées, alors que, dans le groupe témoin, baignant dans l'eau ordinaire, aucune décoloration ne survenait, et les insectes gardaient leur activité.

Pour étudier l'action d'un toxique, un troisième groupe fut placé dans de l'eau contenant une petite quantité de bichlorure de mercure. Les feuilles témoignèrent des mêmes altérations, et les pucerons moururent, comme pour le groupe soumis à l'action du chloroforme. Les signes caractéristiques de la mort n'étaient d'ailleurs apparents qu'à la surface des feuilles, et c'est à peine si l'on pouvait discerner une modification dans les pétioles, qui, dans l'ensemble, paraissaient continuer à vivre.

Je donne, ci-après, les résultats de plusieurs séries d'expériences, d'où il appert que le groupe des pétioles baignant dans l'eau ordinaire avait gardé ses vives réactions habituelles, alors que toute réaction était pratiquement abolie dans les groupes anesthésiés ou intoxiqués.

**Expériences sur les actions des anesthésiques et des toxiques.** — Un petit bouquet de dix pétioles de platanes fut placé, extrémités coupées, dans de l'eau, feuilles à l'air; un nombre égal fut mis dans de l'eau chloroformée; et un troisième bouquet semblable, dans une solution de bichlorure de mercure à 5 pour 100.

De même, trois pétioles de marronniers furent mis dans de l'eau, trois autres dans de l'eau chloroformée, et trois autres encore dans une solution de bichlorure de mercure.

Voici les résultats :

I. — PÉTIOLES DE PLATANE.

Excitant appliqué : une seule vibration de torsion de 90°.

| | Réactions électriques | | |
|---|---|---|---|
| | A[1] | B[2] | C[3] |
| 1 | 21 div. | 1 div. | 0 div. |
| 2 | 31 | 1 | 0,25 |
| 3 | 26 | 2 | 0,25 |
| 4 | 15 | 0 | 0 |
| 5 | 17 | 1 | 0,25 |
| 6 | 23 | 1,5 | 0,25 |
| 7 | 30 | 2 | 0 |
| 8 | 27 | 1 | 0,25 |
| 9 | 29 | 1 | 0,25 |
| 10 | 17 | 0,5 | 0,5 |
| Réactions moyennes | 23,6 | 1 | 0,15 |

II. — PÉTIOLES DE MARRONNIER.

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | 15 div. | 0,5 div. | 0 div. |
| 2 | 17 | 0,5 | 0 |
| 3 | 10 | 0 | 0 |
| Moyennes | 14 | 0,3 | 0 |

Ces résultats concluants démontrent que les réactions sont bien de nature physiologique.

Dans un Chapitre prochain, je donnerai une série de courbes de réaction, montrant comment, par la venue progressive de

(1) Après 24 heures dans l'eau. (Toutes feuilles dressées et fraîches. Pucerons vivants.)

(2) Après 24 heures dans l'eau chloroformée. (Feuilles commencent à se faner au bout de 1 heure; mortes au bout de 3 heures. Pucerons morts.)

(3) Après 24 heures dans le bichlorure de mercure. (Feuilles commencent à se flétrir au bout de 4 heures. Décoloration profonde le long des nervures. Pucerons morts.)



BCU LAUSANNE RAUNER LIBRARY

la mort par intoxication, les réactions subissent une atténuation, progressive, et finissent par cesser complètement.

**Influence d'une température élevée.** — Il est bien connu qu'on peut tuer les plantes en les soumettant à une température élevée.

J'ai pris une tige, et par la méthode du « block », avec une vibration de torsion pour excitant, j'ai obtenu d'énergiques réactions à l'une et à l'autre des extrémités A et B. J'ai alors immergé cette tige, pendant un court moment, dans de l'eau à 65° C., environ, et je l'ai excitée comme avant. Mais aucune réaction ne put être obtenue, ni en A, ni en B. Dans les deux cas, les conditions extérieures étaient les mêmes, et la seule différence entre eux était que, dans le premier cas, la tige était vivante, tandis qu'elle était morte dans le second : nous avons donc ici une nouvelle preuve concluante du caractère physiologique des réactions électriques des plantes.

Le même fait peut être mis en évidence, d'une manière plus frappante encore, en obtenant d'abord, d'une tige fraîche, deux réactions semblables, mais opposées, en A et en B. Puis en tuant une moitié de la tige, la moitié où est B, par exemple, en l'immergeant dans de l'eau chaude. La tige est ensuite replacée dans l'appareil à réaction, et tandis que A donne toujours des réactions énergiques, B n'en donne plus aucune.

Dans les expériences à variation négative, on admettait facilement que le résultat était dû à une action différencielle [1], l'excitation déterminant une réaction plus considérable à l'extrémité intacte qu'à l'extrémité lésée. La méthode du « block » nous permet de vérifier l'exactitude de cette hypothèse. On lèse, ou on tue, l'extrémité B d'une tige, par quelques gouttes d'une solution concentrée de potasse, l'autre extrémité A étant laissée intacte. Un « block » serre la tige entre A et B. On excite A, et l'on obtient une réaction énergique. Puis on excite B, et l'on obtient une réaction infime, ou nulle. Alors

[1] Le c est intentionnel : « par différence ».

on enlève le block, et la tige est excitée dans toute sa longueur. L'excitation intéresse maintenant les deux extrémités; mais comme B ne réagit plus, la réaction manifestée, et sa direction, montrent qu'elle provient de A seul. Ceci n'aurait pas eu lieu si B aussi était restée intacte.

Nous avons donc vérifié expérimentalement que, dans un même tissu, la réaction à un même excitant est plus grande dans une partie intacte que dans une partie lésée.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

# CHAPITRE V.

## RÉACTIONS DES PLANTES. ACTION D'UN EXCITANT ISOLÉ ET D'EXCITANTS SUPERPOSÉS.

Action d'un excitant isolé. — Excitants « superposés ». — Effets d'addition. — Réactions successives d'amplitude croissante. — Fatigue. — Si les excitants sont assez espacés dans le temps, aucune fatigue ne survient. — Fatigue apparaissant avec la fréquence croissante des excitants. — Tissu constamment excité, et fatigue.

**Action d'un excitant isolé.** — Dans un muscle, l'application d'un excitant donne une contraction qui peut être enregistrée mécaniquement ou électriquement. Si le muscle n'est pas fatigué, les réactions successives, dues à des excitants uniformes [1], sont exactement pareilles. Si le muscle a été énergiquement excité, il accuse souvent de la fatigue, et dès lors ses réactions successives deviennent de plus en plus faibles. Dans les nerfs, au contraire, la fatigue est pratiquement nulle, et les réactions successives enregistrées sont toutes pareilles. De même, parmi les plantes, on en trouve qui accusent une fatigue marquée, et d'autres qui n'en témoignent guère.

**Excitants « superposés ».** — Si au lieu d'un excitant isolé, on applique des excitants successifs assez rapidement répétés, il peut arriver que l'un d'eux soit reçu avant que l'effet du précédent ait eu le temps de se dissiper, et qu'alors il y

[1] Sous-entendu : assez espacés dans le temps pour que chacun d'eux puisse agir comme s'il était seul.

BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY

ait empiètement ou « superposition » d'excitants. Et si la fréquence des excitants croît suffisamment, les réactions

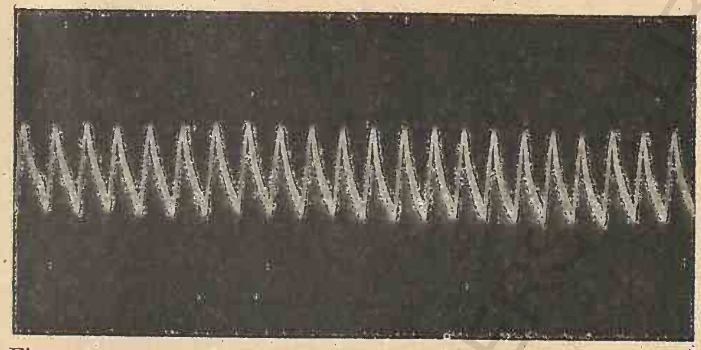


Fig. 16. — *Réactions successives d'amplitude constante* (*radis*).

partielles successives finissent par fusionner, et par donner une courbe résultante continue et unie. Par exemple, pour une certaine fréquence, et une certaine intensité des excitants, un muscle atteint sa contraction maxima, puis la garde,

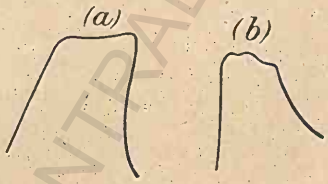



Fig. 17. — *Fusionnement des réactions, par succession rapide des excitations.*

(*a*) Muscle; (*b*) Carotte.

et se maintient rigide : il est en *tétanos* physiologique complet. Si la fréquence des excitants est insuffisante, le tétanos est incomplet, et la courbe enregistrée présente de petites fluctuations. Si, d'autre part, il n'y a pas de fatigue appréciable, la partie supérieure de la courbe correspondant au tétanos

est à peu près horizontale, mais lorsque la fatigue survient, la courbe s'abaisse rapidement.

Les plantes donnent des réactions strictement parallèles à celles-là. Pour des excitants répétés, assez espacés, les réactions successives sont identiques (*fig.* 16). Avec des excitants superposés, il y a fusionnement des réactions, analogue au tétanos physiologique du muscle (*fig.* 17). Enfin, l'apparition de la fatigue modifie les courbes de réaction, exactement comme pour le muscle, ainsi qu'on le verra un peu plus loin.

On peut, en outre, mentionner ici un effet d'addition, dans la « superposition » des excitants :

**Effet d'addition.** — Dans le cas des animaux, on a trouvé qu'en dessous d'une certaine intensité minima, ou « seuil »

Fig. 18. — *Effet d'addition.*

Une seule vibration de torsion, de 3°, ne produit que peu ou pas d'effet : *a*; mais trente telles vibrations, superposées rapidement, provoquent une grande réaction : *b* (Pétiole de navet).

de la sensibilité, un excitant n'éveillait aucune réaction. Cependant un excitant en dessous du seuil, ou subminimum, devient efficace par une répétition convenable.

Les plantes aussi présentent ce phénomène, c'est-à-dire une réaction effective, par addition d'excitants qui, isolés, seraient insuffisants (*fig.* 18).

**Réactions successives d'amplitude croissante.** — Pour certains tissus animaux, lorsqu'on répète l'application d'excitants

d'intensité constante, les réactions successives peuvent aller *crescendo*, c'est-à-dire être d'amplitude progressivement croissante. Tel est le cas typique du muscle cardiaque. Les nerfs aussi en offrent des exemples.

La cause du phénomène est obscure, et paraît liée à l'état du tissu. Tout se passe comme si les excitants dissipaient graduellement la viscosité moléculaire du tissu; et comme si la mobilité moléculaire croissante permettait des réactions successives d'amplitude croissante.

Fig. 19. — *Réactions successives d'amplitude croissante (plante),*

Quelle que soit l'explication du phénomène, je l'ai observé tout pareil dans les plantes (*fig.* 19).

**Fatigue** [1]. — On admet que dans un tissu vivant (comme le muscle) la fatigue survient par un phénomène de désagrégation, ou de désassimilation, provoqué par l'excitant. L'activité fonctionnelle du tissu demeure en dessous de la normale, tant que le dégât n'a pas été réparé par la réfection du tissu, et par le rétablissement de l'assimilation. Il peut aussi y avoir

---

[1] Manifestée graphiquement par des *réactions successives réduites*, ou *d'amplitude décroissante.*

BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY

accumulation de déchets dus à la fatigue, et ces derniers agiraient comme des toxiques, ou comme des substances chimiques déprimantes. On suppose ainsi que le sang des animaux remplit la double fonction d'apporter les matériaux d'assimilation, et de remporter les déchets, en dissipant ainsi la fatigue.

Cette explication semble pourtant insuffisante, pour cette raison qu'après un court repos, la fatigue d'un muscle, séparé du corps, et exsangue, se dissipe. Il est bien évident que, dans ce cas, la fatigue a dû se dissiper pour d'autres causes que l'élimination des déchets par une circulation et que le rétablissement d'une assimilation.

Il sera donc utile d'étudier, dans des conditions de vie plus simple, certains aspects de la fatigue présentée par les tissus végétaux, sans processus de réfection, et sans circulation active qui puisse éliminer les déchets.

Nous avons dit plus haut, rappelons-le, que la variation de force électromotrice, causée par un excitant, est concomitante d'une perturbation moléculaire des tissus excitables dont l'équilibre a été détruit, et que la courbe de retour au zéro traduit le retour à l'équilibre, ou « remise en état ».

**Il ne survient pas de fatigue, si des intervalles de temps suffisants séparent les excitants successifs.** — L'étude d'une courbe de réaction nous donne des indications sur la distorsion moléculaire subie par le tissu excité.

Prenons d'abord une expérience comme celle dont le diagramme est donné figure 20 (*a*). La courbe montre que le retour au zéro, ou retour du tissu au *statu quo ante*, une minute après l'application de l'excitant, est complet : l'état moléculaire, à la fin de ce retour, est exactement le même qu'au début de l'excitation. De sorte que la seconde courbe de réaction, et les suivantes, sont identiques à la première, *pourvu qu'entre chacune d'elles un temps suffisant ait été laissé au tissu pour se remettre complètement en état.* Dans ce cas , il n'y a pas de diminution à l'amplitude des réactions, c'est-à-dire pas de fatigue.

Pour le muscle, le phénomène est exactement parallèle : « *Pour le muscle en état de circulation et de nutrition normale, on peut toujours, entre chaque couple d'excitants successifs, trouver un intervalle de temps tel, que les contractions n'accusent aucune diminution, même après une application prolongée; et qu'alors il ne survienne aucune fatigue* [1]. »

**Fatigue apparaissant avec la fréquence croissante des excitants.** — Si maintenant l'on accroît la fréquence des excitants, les courbes de réaction témoignent de certaines modifications remarquables.

Dans la figure 20, la première partie (*a*) montre quatre réac-

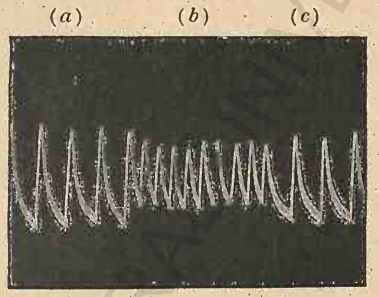



Fig. 20. — *Diagramme montrant l'affaiblissement des réactions lorsqu'on ne laisse pas au tissu le temps de revenir complètement à son état initial.*

En (*a*), les intervalles des excitants sont d'une minute. En (*b*), ils sont réduits à une demi-minute, et les réactions sont réduites. En (*c*), on a repris la fréquence première, et les réactions redeviennent plus intenses (radis).

tions obtenues à 1 minute d'intervalle, temps suffisant pour une remise en état complète.

---

[1] Biedermann, *Electrophysiology*, p. 86.

Puis, en gardant les mêmes excitants, on a réduit les intervalles entre eux à une demi-minute, et l'on remarque, en même temps (*fig.* 20, *b*), que les réactions sont moins intenses et moins régulières que dans la première partie. La figure donne quelque éclaircissement à ce sujet. En effet, on voit qu'au moment où la fréquence d'excitation a été accrue, le tissu n'avait pas eu le temps de se remettre complètement en état. Le retour moléculaire vers l'équilibre initial n'était pas encore effectué, que, déjà, en sens inverse, un nouvel excitant était appliqué. D'où une diminution dans l'amplitude des dix réactions suivantes.

On a repris alors la fréquence première de 1 minute, et les trois réactions suivantes sont d'amplitude accrue.

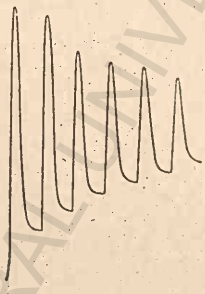


Fig. 21. — *Fatigue du céleri.*

Vibrations de torsion, de 30°, à intervalles d'une demi-minute.

On peut signaler un phénomène analogue, à propos des réactions musculaires, où « l'amplitude de la contraction décroît d'autant plus rapidement que décroît l'intervalle entre les applications d'excitants » (1).

D'après ce que nous venons de dire, il semble qu'une des causes de la diminution des réactions, ou de la fatigue, est dans une distorsion résiduelle. Ceci se voit nettement par la figure 21, qui est un diagramme obtenu avec une tige de céleri.

(1) Biedermann, *loc. cit.*

On remarquera que les intervalles entre les applications de l'excitant ne permettant chacun qu'une remise en état impar-

Fig. 22. — *Fatigue d'un pétiole de chou-fleur.*

Excitation : vibration de torsion, de 30°, à intervalles d'une minute.

faite, l'amplitude des réactions successives subit une réduction progressive. La figure 22 est le diagramme, enregistré photographiquement, de la fatigue d'un pétiole de chou-fleur.

Il est évident que, toutes autres choses restant égales, la

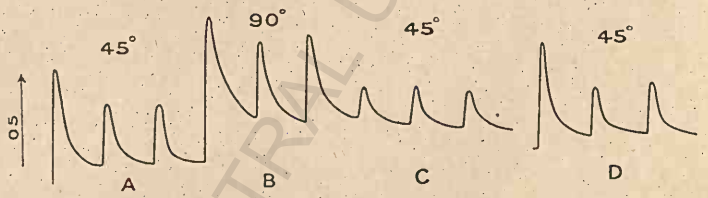



Fig. 23. — *Fatigue due à un surmenage antécédent.*

Excitations successives à intervalles d'une minute.
L'intensité de l'excitation est la même en C qu'en A, mais les réactions sont plus faibles en raison du surmenage B.
Par un repos d'un quart d'heure, la fatigue est en grande partie dissipée, et pour cette même excitation, les réactions en D sont d'amplitude plus grande qu'en C.
La flèche, à gauche, représente 0,05 volt (pétiole de navet).

distorsion résiduelle sera d'autant plus grande que les excitants auront été plus intenses. On le voit bien à la figure 23, où une première série de trois courbes, A, correspond à une

vibration de torsion de 45°, et où une seconde série, B, d'amplitude accrue, correspond à une torsion de 90°. En revenant, en C, à un excitant de 45°, les réactions sont réduites, plus réduites que celles de A : elles trahissent une fatigue, due au surmenage excessif imposé en B.

Si la fatigue est bien réellement due à une distorsion résiduelle, puisque celle-ci disparaît avec le temps, nous devons nous attendre à ce qu'après un certain repos, les réactions reprennent leur vigueur première. Pour le vérifier, j'ai renouvelé ici les excitants (de 45°) au bout d'un quart d'heure. On verra, par le diagramme D, que la fatigue avait bien disparu.

Dans les courbes des séries A, B, C, D, une particularité est à noter. En raison d'une distorsion résiduelle, précédente, relativement petite, la première des réactions de A, B, D est assez forte. Dans les quatre séries, les distorsions résiduelles, après la première réaction, sont semblables, et les réactions qui suivent la première sont plus faibles que celle-ci, et sensiblement égales entre elles. La première réaction de A est forte, parce qu'elle survient après un long repos. La première réaction de B est forte, parce qu'elle est due à un excitant d'intensité double. Mais la première réaction de C n'est *pas* forte, parce qu'elle survient alors qu'il existe encore une distorsion résiduelle notable. Et la première réaction de D est, de nouveau, forte, parce que le repos des 15 minutes a permis à la distorsion de se dissiper.

**Tissu constamment excité, et fatigue.** — La fatigue apparaît d'une manière très nette dans les diagrammes de réaction d'un tissu, soumis à des excitants incessants, c'est-à-dire en tétanos physiologique. Lorsque, dans certains muscles par exemple, la fatigue est grande, la courbe du tétanos physiologique décline rapidement, dès son sommet. Les plantes présentent le même phénomène (*fig.* 24).

Le diagramme suivant (*fig.* 25) indique comment le repos dissipe la fatigue, en permettant le retour à l'état moléculaire initial. La première courbe est celle d'une plante fraîche, qui a subi une excitation d'une durée de 2 minutes : la réaction est très vigoureuse. On donne 2 minutes de repos, puis on

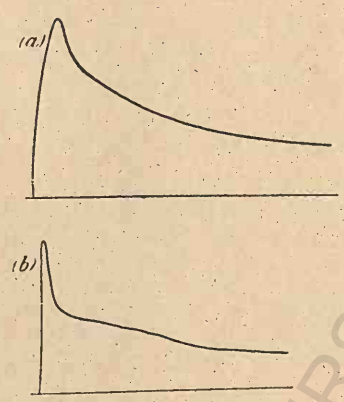



Fig. 24. — *Fatigue survenant dans un tissu constamment excité.* (*a*) Muscle; (*b*) Pétiole de céleri.

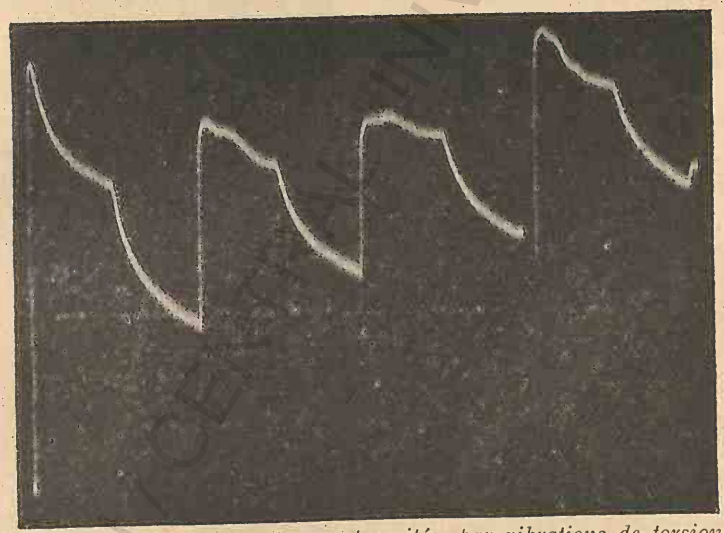


Fig. 25. — *Carotte constamment excitée, par vibrations de torsion* (*de* 50°).

Les trois premières réactions correspondent à des régimes d'excitation d'une durée de 2 minutes, suivis de 2 minutes de repos. Après le troisième, on a donné à la plante un repos de 5 minutes. Le repos ayant permis à la fatigue de se dissiper, la nouvelle réaction est plus forte.

BCU STRASBOURG UNIVERSITY LIBRARY

applique une seconde excitation de 2 minutes : la réaction est visiblement moindre. En recommençant une troisième fois le résultat est sensiblement le même. Alors on donne un repos de 5 minutes, et la distorsion résiduelle ayant partiellement disparu, une nouvelle excitation donne, de nouveau, une forte réaction.

Les résultats précédents, obtenus dans les conditions simples de la vie végétale, exemptes comme elles le sont de complications et d'incertitudes, peuvent jeter quelque lumière sur le phénomène obscur de la fatigue des tissus animaux.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

# CHAPITRE VI.

## RÉACTIONS DES PLANTES. VARIATION A DEUX ALTERNANCES.

Variation à deux alternances. — Effet « second » positif, et réactions positives. — Variations électriques radiales.

Lorsqu'un excitant est appliqué à une plante, en un point, une perturbation moléculaire, ou onde d'excitation, rayonne de ce point.

**Variation à deux alternances.** — Cette onde de perturbation moléculaire est accompagnée d'une onde de perturbation électrique. (D'un point plus perturbé à un point moins perturbé, la relation électrique est celle du cuivre au zinc d'un couple voltaïque.) Il faut un certain temps pour qu'une perturbation se propage d'un point à un autre, et elle peut diminuer d'intensité en s'éloignant de son centre d'origine.

Soit une perturbation d'origine C. Elle atteindra deux points rapprochés A et B presque en même temps, et avec la même intensité. La perturbation électrique y sera aussi la même. Il y aura équilibre, et aucun courant ne s'y manifestera.

En abolissant, ou en réduisant la sensibilité de B, comme on le fait par une lésion, B ne réagit plus, l'équilibre précédent est détruit, et il se manifeste une réaction due à la perturbation de A. On obtient le même résultat par un serrage à bloc entre A et B, empêchant la perturbation d'atteindre B.

Mais il est possible de provoquer des réactions sans avoir recours ni à une lésion, ni à un « block ». En effet, si nous avons deux contacts, en A et en B, et que nous appliquions une percussion *plus près* de A que de B (*fig.* 26, *a*), alors :

1° la perturbation atteint A avant B; 2° la perturbation est plus intense en A qu'en B. On peut même s'arranger pour qu'en B elle soit minime, au point d'en devenir négligeable.

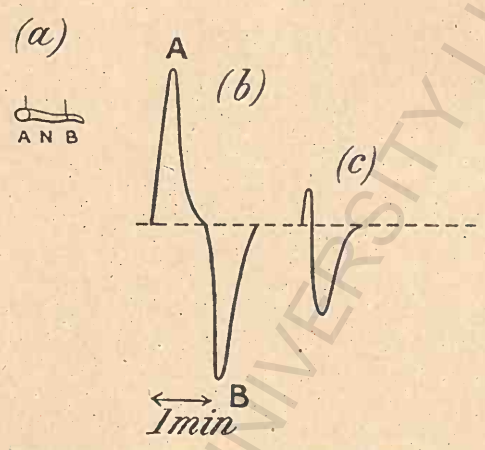



Fig. 26. — *Variation à deux alternances.*

Il est donc possible d'obtenir des réactions, sans lésion ni block, lorsque la perturbation s'amortit en se propageant. Dans ce cas, une percussion donnée près de A provoque un courant de réaction allant dans une certaine direction; et si elle est donnée près de B, la percussion provoque un courant de réaction de sens inverse (*fig.* 26, *b*).

Théoriquement, on doit donc pouvoir trouver un point neutre, entre A et B, tel qu'en l'excitant, les ondes de perturbation provoquées atteignent A et B au même instant et avec la même intensité. Si, de plus, la vitesse de remise en état est la même aux deux points, les perturbations en A et B continueront à se faire équilibre, et un galvanomètre n'accusera aucun courant. Ainsi, en prenant une racine cylindrique de radis, il m'est arrivé de trouver un point neutre qui, excité, ne donnait lieu à aucun courant de réaction. Mais à droite et à gauche de lui on provoquait deux courants, de sens opposés.

Il est d'ailleurs difficile de se procurer une racine parfaite-

ment cylindrique, car elle s'effile toujours à l'une de ses extrémités, et la conductivité dans cette direction n'est pas la même que dans la direction inverse. Il est donc malaisé de trouver un point absolument neutre.

On peut cependant trouver un point qui s'en rapproche beaucoup, et en excitant le tissu tout auprès de lui, on provoque une variation à deux alternances très intéressante.

Soit une tige de chou-fleur :

1° Un excitant est appliqué beaucoup plus près de A que de B (et la minime perturbation en B est négligeable). La réaction est positive, et le retour au zéro a lieu au bout de 60 secondes (*fig.* 26, *b*, A).

2° L'excitant est alors appliqué près de B. La réaction, cette fois, est négative (*fig.* 26, *b*, B).

3° L'excitant est ensuite appliqué près du point neutre N. Dans ce cas, en raison de la légère différence dans les vitesses de propagation à droite et à gauche, prend naissance une variation à deux alternances (*c*) (*fig.* 26). Le diagramme montre d'abord que la perturbation arrive plus tôt en A qu'en B : d'où la petite réaction positive. Mais, pendant que la perturbation se dissipe en A, l'onde atteint B, et donne naissance à un courant de réaction de sens opposé, qui hâte le retour de A au zéro (12 secondes au lieu de 60). Ce retour effectué, la seconde phase, négative, due à la réaction de B peut alors se développer complètement.

**Variation « seconde » positive.** — Si nous regardons comme négative la réaction de A, celle de B apparaît comme une variation secondaire, ou « seconde » positive.

Dans les nerfs, par exemple, où l'on a établi des contacts en deux régions, l'une lésée et l'autre intacte, on observe parfois d'abord une variation négative, et ensuite une variation seconde positive. Il se peut, en effet, que le point intact, proche, présente d'abord la variation négative habituelle, puis que le point lésé, plus éloigné, présente ensuite une variation opposée, donc positive.

Et ceci pourra toujours survenir excepté : 1° si l'extrémité lésée a été complètement tuée, et ainsi rendue incapable d'une réaction quelconque; ou bien, 2° si entre A et B, il y a un « block » efficace, tel que la perturbation ne puisse atteindre que l'un seulement des deux points.

Cependant, il m'est arrivé d'observer une variation seconde positive, même avec un « block » parfait. Tout semble se passer comme si la distorsion moléculaire, due à l'excitant, se manifestait d'abord par une variation négative, puis revenait au zéro, et dépassait même ce point, en sens inverse, et donnait alors une variation positive.

**Variations positives.** — A l'état normal, les réactions d'un nerf ou d'un muscle sont négatives. Celles de la rétine sont

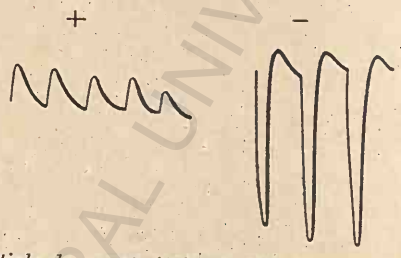



Fig. 27. — *Pétiole de navet, fatigué. Réactions anormales positives rendues négatives et normales par un excitant énergique* (1).

Les intensités respectives des deux excitations sont entre elles dans le rapport de 1 à 7.

positives. Mais le signe de ces réactions peut changer, si les actions appliquées au tissu provoquent une modification molé-

(1) En général, il importe peu que les réactions soient enregistrées ascendantes ou descendantes. Il est plus commode, d'ailleurs, de les examiner avec les sommets disposés en haut. Mais lorsqu'il est nécessaire de distinguer le signe des réactions, les réactions positives sont enregistrées avec les sommets en haut, et les négatives avec les sommets en bas.

culaire suffisante. C'est ainsi qu'un nerf fatigué a souvent des variations positives, et qu'une rétine fatiguée en donne de négatives.

Chose curieuse, dans les réactions des plantes, j'ai souvent trouvé les phénomènes exactement parallèles. Les plantes fraîches, comme il a été dit, ont en général des réactions négatives. Mais lorsqu'elles sont quelque peu fanées, elles ont

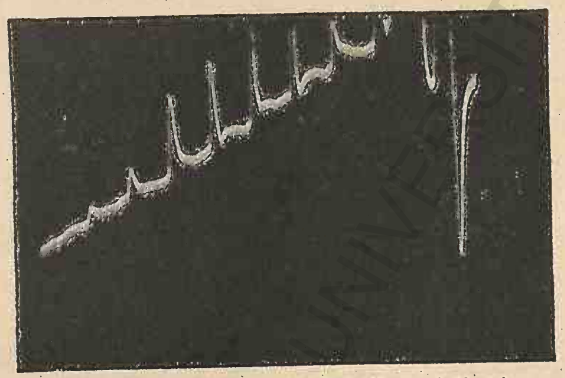


Fig. 28. — *Pétiole de chou-fleur, fatigué.*
*Réactions positives, anormales, redevenant normales et négatives.*

L'intensité de l'excitant, à l'aide d'un ressort percutant, a passé de 1 à 10. Quand elle a atteint 10, les réactions ont subi un renversement et sont redevenues négatives et normales. (Une partie des huitième et neuvième courbes de réaction s'est projetée hors du cliché.)

parfois des réactions positives. Puis, de même que dans le nerf modifié, les réactions positives anormales font place, sous l'influence d'un excitant intense et prolongé, à des réactions normales négatives, de même, dans la plante modifiée, les réactions positives anormales redeviennent négatives par une application d'excitant intense (*fig.* 27). Dans certains cas, j'ai pu suivre les étapes de ce renversement, en accroissant progressivement l'intensité des excitants donnés : les réactions positives deviennent d'abord de plus en plus vigou-

reuses, puis, à un moment donné, subissent un renversement, c'est-à-dire changent de sens (*fig.* 28).

Ainsi, dans des conditions anormales de fatigue, le sens des réactions des plantes se renverse. Et j'ai trouvé parfois des renversements analogues en soumettant des plantes à des températures anormalement hautes ou basses.

**Variations électriques radiales.** — Nous avons vu qu'un courant de réaction va, dans la plante, d'une région plus excitée

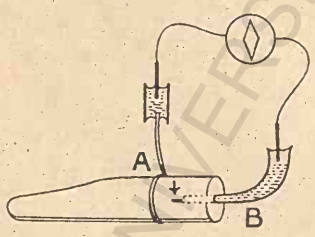



Fig. 29. — *Variations électriques radiales.*

à une région moins excitée. Une expérience, importante théoriquement, est la suivante : on fore un trou dans l'axe d'une tige d'assez grand diamètre, et l'on y place un contact, en disposant un autre contact à la surface. Au bout d'un moment, le courant de lésion disparaît. En excitant alors la tige par des percussions, ou par des vibrations de torsion, on constate qu'un courant de réaction va de la périphérie plus excitable vers la partie axiale, moins accessible aux excitations (*fig.* 29). Par conséquent, lorsqu'une onde de perturbation se propage le long d'une plante, il y a une variation électrique radiale concomitante. Le balancement d'un arbre par le vent donnerait ainsi des variations électriques radiales.

# CHAPITRE VII.

## RÉACTIONS DES PLANTES. RELATION ENTRE L'EXCITANT ET LA RÉACTION.

A excitants croissants, réactions croissantes. — A excitants trop intenses, réactions décroissantes.

Dans un tissu vivant, avons-nous dit, toute distorsion moléculaire due à un excitant est accompagnée d'une perturbation électrique, qui s'amortit, peu à peu, avec le retour des molécules à l'équilibre initial. Plus grande est la distorsion moléculaire, plus grande est la manifestation électrique. La réaction électrique est ainsi l'expression d'une distorsion moléculaire, due à l'excitant venu du dehors.

**Courbe de la relation entre l'excitant et la réaction.** — Considérons maintenant un muscle ou un nerf, et leurs réactions (mécanique ou électrique, pour le premier; électrique, pour le second), et examinons comment l'amplitude de ces réactions varie en fonction des intensités de l'excitant.

Pour les premiers degrés de l'excitant, les réactions sont d'abord minimes.

Pour des intensités croissantes de l'excitant, l'amplitude des réactions subit un accroissement rapide.

Puis les intensités de l'excitant continuant à croître, l'amplitude des réactions tend vers un maximum.

En construisant la courbe qui représente ces variations, on constate qu'elle est d'abord convexe par rapport à l'axe des abscisses, puis qu'elle continue à monter, en passant par une

inflexion, et finalement qu'elle devient concave par rapport à l'axe (*fig.* 30).

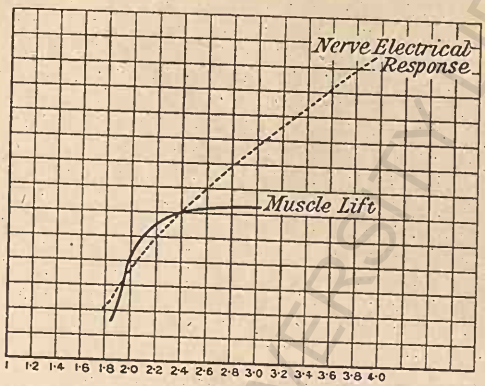



Fig. 30. — *Diagramme de la relation entre les intensités de l'excitant et l'amplitude des réactions.*

En abscisses : les intensités de l'excitant.
En ordonnées : les amplitudes des réactions (Waller).

Les réactions du muscle atteignent leur maximum plus vite que celles du nerf. On constate de plus que le champ efficace de l'excitant n'est jamais très étendu, c'est-à-dire que lorsque ses intensités dépassent des limites assez modérées, l'amplitude des réactions, pour raison de fatigue ou pour toute autre cause, cesse de croître et peut commencer à décliner.

Dans le même ordre de phénomènes, les plantes m'ont donné des résultats fort intéressants, permettant certaines suggestions à l'égard des différents types de réactions animales.

1° Pour obtenir des réactions de type simple, et non compliquées de phénomènes secondaires, il faut d'abord prendre des échantillons se fatiguant peu. Les ayant réunis, j'ai entrepris deux séries d'expériences. Dans la première (A), l'excitant appliqué était une percussion. Dans la seconde (B), une vibration de torsion.

(A) Le levier percutant tombait de hauteurs successives $h$, $2\,h$, $3\,h$, et ainsi de suite. Les diagrammes indiquent claire-

ment des réactions successives, également croissantes (*fig.* 31).

Fig. 31. — *Réactions accrues par percussions d'intensité croissante* : 1 : 2, 3 : 4 (*pétiole de navet*).

(B) La torsion prenait les valeurs successives :

2°,5; 5°; 7°,5; 10°; 12°.5.

On constate que l'amplitude de la courbe de réaction tend vers une limite (*fig.* 32).

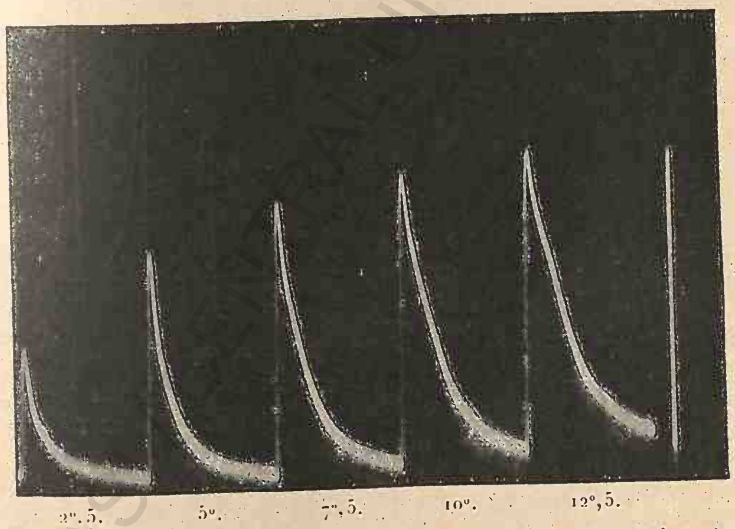



Fig. 32. — *Réactions accrues par vibrations de torsion croissante* (*tige de chou-fleur*).

Les intervalles d'application des excitants sont de 3 minutes. La verticale de droite représente 0,1 volt.

TABLEAU DONNANT LES VALEURS CROISSANTES SUCCESSIVES DES VARIATIONS ÉLECTRIQUES, POUR DES VALEURS CROISSANTES DE L'EXCITANT.

| Angle de vibration de torsion. | Force électromotrice. |
|---|---|
| o | volt |
| 2,5 | 0,044 |
| 5 | 0,075 |
| 7,5 | 0,090 |
| 10 | 0,100 |
| 12,5 | 0,106 |

2° La figure suivante montre que pour une valeur minima de l'excitant, la variation est minime aussi, puisque l'intensité

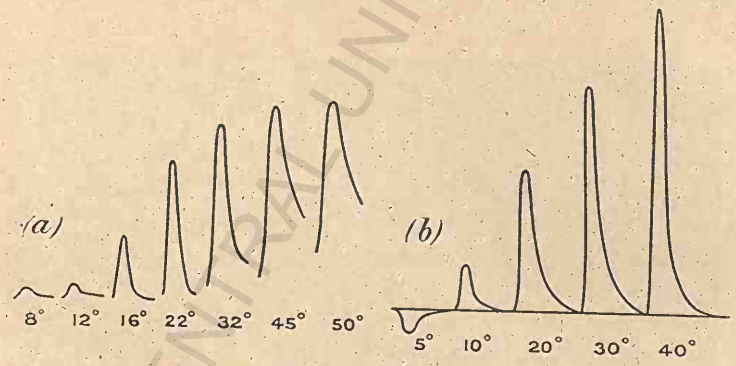



Fig. 33. — *Réactions à des vibrations de torsion, d'angle croissant.*

(*a*) Diagramme obtenu avec un radis frais. Les intervalles d'application des excitants sont de 2 minutes. Chaque réaction est enregistrée pendant 1 minute.

(*b*) Diagramme obtenu avec un radis fatigué. Il y a une réaction inverse pour un excitant minime de 5°.

de l'excitant croissant, l'amplitude des réactions croît aussi rapidement; après quoi, elle tend vers une limite maxima (*fig.* 33, *a*).

3° Comme modalité extrême du cas précédent, j'ai souvent constaté le curieux phénomène que voici. Pendant l'accroissement progressif des intensités de l'excitant, à partir d'une valeur assez basse, on n'obtenait d'abord aucune réaction. Puis, lorsqu'une certaine intensité critique était atteinte, une réaction maxima se manifestait soudain, qui n'était plus dépassée, même si l'intensité de l'excitant croissait encore.

Ce phénomène est parallèle à celui connu, en physiologie animale, sous le nom de « principe du tout ou rien ». Pour le muscle cardiaque, par exemple, il est une certaine valeur minima de l'excitant qu'il est nécessaire d'atteindre pour avoir une réaction; mais ensuite un accroissement de l'excitant ne fait plus croître les réactions.

4° De l'inspection des diagrammes de réaction donnés ici, il se dégage aisément que si l'on construit la courbe exprimant la relation entre les intensités de l'excitant et l'amplitude des réactions, la pente de la courbe (ou angle de sa tangente avec une horizontale) est d'abord minime, puis croît, et enfin tend à redevenir nulle. La courbe elle-même, d'abord convexe par rapport à l'axe des abscisses, croît, passe par une inflexion, et finit par être concave par rapport à l'axe, en tendant à devenir horizontale.

On peut observer, dans certains cas, une accentuation de la convexité du début, surtout lorsque le tissu soumis à l'expérience est fatigué. Cela est dû à ce que, dans ces conditions, la plante, pour des valeurs de l'excitant inférieures au seuil critique, tend à donner des réactions anormales positives, au lieu de réactions négatives normales. Et en effet, au début, il peut y avoir une petite réaction renversée (*fig.* 33, *b*).

**Diminution des réactions, pour une très grande intensité de l'excitant.** — Lorsque l'intensité de l'excitant dépasse une certaine valeur, les réactions des tissus animaux peuvent subir une diminution. Ainsi Waller a trouvé que, lorsque l'intensité lumineuse croît progressivement, les réactions de la rétine commencent par croître aussi, puis ensuite peuvent s'atténuer:

Malheureusement, le phénomène se complique de celui de la fatigue, qui lui-même n'est pas éclairci. De sorte qu'il est difficile de savoir si l'atténuation des réactions est due à la fatigue, ou à un renversement, directement lié à l'application d'un excitant très intense.

La figure précédente (*fig.* 33, *b*) montrait un renversement pour une valeur minime de l'excitant : il n'y aurait rien d'improbable à ce que plus d'un renversement pût survenir.

Les phénomènes physiques font d'ailleurs connaître de nombreux exemples de renversement.

L'aimantation d'un barreau de fer est ordinairement accompagnée d'allongement. Mais Bidwell a trouvé que si l'aimantation est poussée très loin, l'allongement cesse, et que, si l'aimantation est poussée plus loin encore, le barreau se contracte.

De même, un cliché photographique, exposé à la lumière, donne une première image négative. Une exposition plus prolongée donne une image positive. Plus prolongée encore, une image négative. On a ainsi une suite de renversements alternés.

Dans les photographies d'éclairs, on distingue deux sortes d'images. Les unes sont positives, claires, et correspondant à une décharge d'intensité moyenne, et les autres, négatives, noires, qu'on avait appelées « décharges obscures », sont des renversements de l'image, dus au contraire à une décharge très intense.

En étudiant les variations de la conductivité d'une grenaille métallique, sous l'influence des ondes hertziennes, j'ai souvent remarqué qu'une radiation faible et une radiation intense produisent des effets opposés, et qu'il en est de même pour des durées d'application brèves ou longues [1].

**Diminution des réactions, pour de grandes intensités de l'excitant, due à une fatigue antérieure du tissu.** — Il y a, en revanche, des cas où l'affaiblissement des réactions, pour de grandes intensités de l'excitant, est nettement due à une fatigue antérieure du tissu en cause.

---

[1] Voir *On Electric Touch* (*Proc. Roy. Soc.*, Aug. 1900).

Les diagrammes, en ces cas-là, indiquent très bien la manière dont survient l'affaiblissement. La figure suivante (*fig.* 34) donne

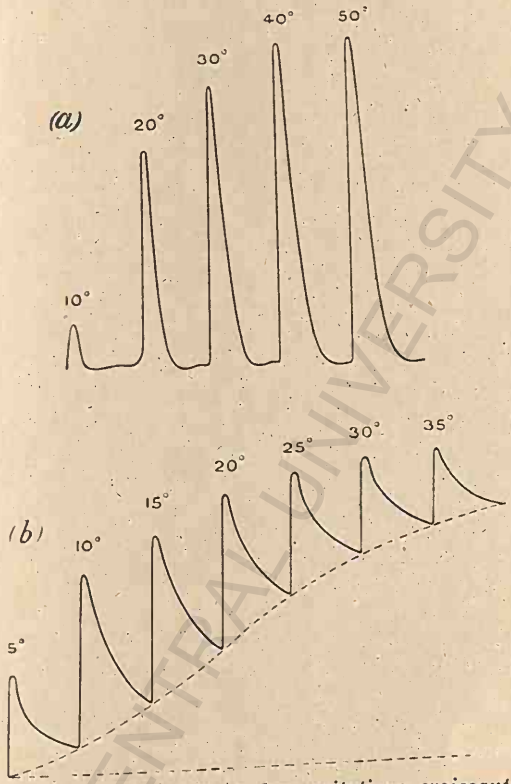



Fig. 34. — *Réactions à des excitations croissantes données par deux tiges de choux-fleur.*

En (*a*) pas de fatigue; en (*b*) fatigue.

deux exemples de réactions à des intensités croissantes d'un excitant. Il s'agit de deux pétioles de choux-fleur. La fatigue du premier était minime. Celle du second était notable. On notera que les courbes obtenues en joignant les sommets des courbes successives de réaction sont très semblables.

BCU / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Dans le premier cas (*a*), il n'y a pas de fatigue, le retour au zéro après chaque application d'excitant étant complet. Chaque réaction a donc lieu à partir d'un état d'équilibre, et les valeurs successives de chacune croissent avec les intensités de l'excitant. Mais dans le second cas (*b*), lorsque la tige reçoit un nouvel excitant, la distorsion résultant de l'excitant précédent n'est pas encore dissipée. Le retour au zéro est donc de plus en plus incomplet, ainsi que le montrent la direction de la ligne pointillée, qui touche tous les points de retour de (*b*), et la direction de celle qui toucherait tous les points de retour de (*a*) : horizontale pour (*a*), elle représente bien l'équilibre chaque fois récupéré ; montante pour (*b*), elle indique l'écart progressif des retours. De sorte que si l'on mesurait les ordonnées des sommets des courbes successives de réaction, à partir de l'horizontale de référence, pointillée, on trouverait bien encore des quantités allant en croissant. Mais si, au lieu de l'horizontale, que les retours n'atteignent plus jamais, on prend, pour ligne de référence, la ligne (pointillée) de ces retours, la valeur manifeste des réactions successives va, ainsi que le diagramme l'indique, en décroissant.

BCU IASI / CENTRAL LIBRARY

# CHAPITRE VIII.

## RÉACTIONS DES PLANTES. INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE.

Influence d'une température basse. — Influence d'une température haute. — Détermination du point léthal. — Accroissement des réactions, secondaire à une variation de température. — Mort par la vapeur bouillante, et abolition des réactions.

Il y a toujours, pour une plante donnée, un intervalle de température où sa vitalité est maxima.

Au-dessus de cet intervalle optimum, la vitalité décline graduellement, jusqu'à une température extrême, où elle s'annule, et la plante peut mourir si on l'y maintient. Au-dessous de cet intervalle, la vitalité décline également, jusqu'à une autre température extrême où elle s'annule encore; et, plus bas, la plante, de nouveau, peut mourir.

Ces deux limites de température, supérieure et inférieure, sont donc point léthal pour la plante. La résistance de la plante y est, d'ailleurs, toujours fonction du temps d'exposition.

Enfin on sait qu'il y a des plantes vivaces et d'autres très affectées par les variations de température; et, au sein d'une même espèce, on trouve encore des différences individuelles notables.

Cela étant, j'ai désiré me rendre compte si la température, qui modifie la vitalité des plantes, modifiait aussi leurs réactions électriques.

**Influence d'une température basse.** — J'eus d'abord l'occasion d'étudier les effets du froid, de la venue soudaine d'une

gelée. La semaine d'avant, avec des radis, par une température d'environ 10° C., j'avais obtenu des réactions énergiques, de 0,05 à 0,1 volt. Mais quelques jours après, par le froid, les

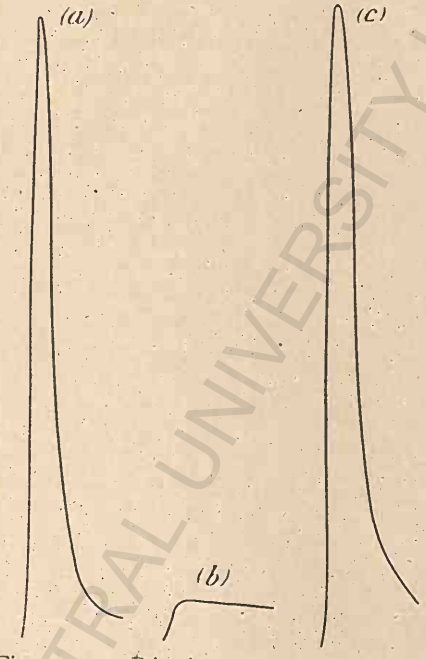



Fig. 35. — *Réactions d'un « Eucharis », diminuées par un abaissement de température.*

(*a*) Réaction normale à + 17° C.
(*b*) Réaction presque nulle après un séjour de 15 minutes dans une enceinte à — 2° C.
(*c*) Réaction récupérée après avoir réchauffé la plante à + 20° C.

réactions étaient devenues pratiquement nulles. Certains individus, cependant, résistaient encore un peu, mais la moyenne de leurs réactions, qui était de 0,075 volt à la température ordinaire, était tombée à 0,003 volt, c'est-à-dire le vingt-cinquième de la précédente. En réchauffant à 20° C. ces

radis gelés, on leur rendait une vitalité appréciable, manifestée par des réactions accrues. Mais aucune réactivité ne fut rendue à d'autres, qui avaient été plus gravement affectés. Il apparut ainsi que le froid avait tué certains radis, qui ne purent être ranimés, tandis que d'autres étaient seulement plongés dans une sorte de torpeur, d'où la chaleur les ramena.

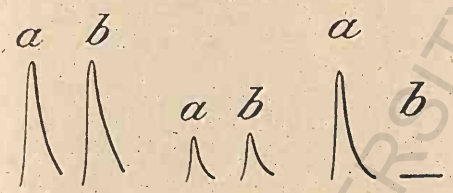



Fig. 36. — *Influence du froid.*
*Réactions secondes du Lierre, du Houx et de l' « Eucharis ».*

(*a*) Réactions normales.
(*b*) Réactions obtenues après un séjour de 24 heures à 0° C.

J'expérimentai ensuite l'influence d'une baisse de température artificielle. Une certaine espèce de *Lis Eucharis* est très sensible au froid. J'ai d'abord pris les réactions du pétiole de ce Lis, à la température ordinaire de la pièce (17° C.). Puis, je l'ai placé, pendant 15 minutes, dans une enceinte froide, à — 2° C., et les réactions furent alors trouvées pratiquement nulles. Enfin, après avoir plongé la plante, un instant, dans de l'eau à + 20° C., j'ai vu reparaître la réaction (*fig.* 35). Mais si la plante avait subi le froid trop longtemps, aucune reviviscence ne pouvait être suscitée.

Avec une température de 0° C., j'ai vu décliner, de même, les réactions d'un pétiole d'*Arum*.

Je comparai ensuite la sensibilité de différentes plantes, aux basses températures. Pour cela, je choisis un *Lis Eucharis*, un Lierre et un Houx. Je provoquai leurs réactions à 17° C. Vers la troisième ou quatrième réaction, les amplitudes respectives restaient constantes. Je les enregistrai, puis plaçai les trois plantes dans une enceinte à 0° C. pendant 24 heures. Après quoi, je provoquai et enregistrai de nouveau leurs réac-

tions, à la température ordinaire de la pièce : tandis que le *Lis Eucharis*, dont la sensibilité au froid est connue, ne présente plus aucune réaction, celles du Lierre et du Houx, plus résistantes, n'ont pas subi d'altération appréciable (*fig.* 36).

J'ai noté un autre phénomène très curieux : lorsque, par températures hautes ou basses, une plante approche du point léthal, et que ses réactions tendent vers zéro, il arrive parfois qu'elles subissent un renversement.

**Influence d'une température élevée et détermination du point léthal.** — Je cherchai ensuite à voir si une élévation de température, au delà de l'intervalle favorable, déprimait les réactions, et si, à une température extrême, celle du point léthal, la réaction s'annulait.

Je pris six radis, et enregistrai leurs réactions à des températures croissantes. Il était tard dans la saison, et leurs réactions électriques étaient moindres que celles des radis pris antérieurement. Après avoir été, pendant 5 minutes, plongé dans l'eau à une température déterminée (17° C.), chaque radis était placé dans l'appareil à vibration de torsion, et l'on observait ses réactions; puis on l'enlevait, on le mettait, pendant 5 minutes, dans un bain-marie à une température plus élevée (30° C.), après quoi on observait de nouveau ses réactions. Et ainsi de suite avec chacun, jusqu'à la température où toute réaction était abolie, ou à peu près. Je donne ici le tableau des résultats obtenus. On voit que les réactions commencent à s'annuler pour des températures de 53 à 55° C.

TABLEAU MONTRANT COMMENT UNE TEMPÉRATURE ÉLEVÉE ABOLIT LES RÉACTIONS.

| Radis. | Températures. | Déviations du galvanomètre ($100^{div} = 0^{volt},07$). |
|---|---|---|
| Premier radis | 17° | $70^{div}$ |
| | 53 | 4 |
| Deuxième radis | 17 | 160 |
| | 53 | 1 |
| Troisième radis | 17 | 100 |
| | 50 | 2 |
| Quatrième radis | 17 | 80 |
| | 55 | 0 |
| Cinquième radis | 17 | 40 |
| | 60 | 0 |
| Sixième radis | 17 | 60 |
| | 55 | 0 |

**Chauffage électrique.** — Les expériences précédentes sont assez laborieuses, à cause de l'obligation où l'on est de sortir, chaque fois, la plante de l'appareil, de chauffer, puis de l'y remettre. Pour obvier à cet inconvénient, j'ai adopté la modification suivante. L'échantillon à étudier était placé dans une enceinte vitrée (*fig.* 37), contenant un fil de maillechort enroulé en hélice, dont on réglait la température, à volonté, par un courant électrique. J'expérimentai avec un pétiole de céleri. On le maintenait pendant 10 minutes à une température donnée, et l'on enregistrait deux réactions. Puis la température était élevée de 10°, et l'on recommençait. Et ainsi de suite.

Dans le diagramme (*fig.* 38) on note que lorsque la température monte de 20 à 30°, les réactions subissent un déclin très marqué. En même temps, dans ce cas tout au moins, le retour au zéro était plus rapide. A 20°, par exemple, la réaction déviait le galvanomètre de 21 divisions, et le retour au zéro n'était même pas complet au bout d'une minute. A 30°, la déviation n'était plus que de 7,5 divisions, mais le retour au zéro se faisait en 12 secondes. La température continuant à monter, les

réactions continuaient à décliner, et ceci était général, alors

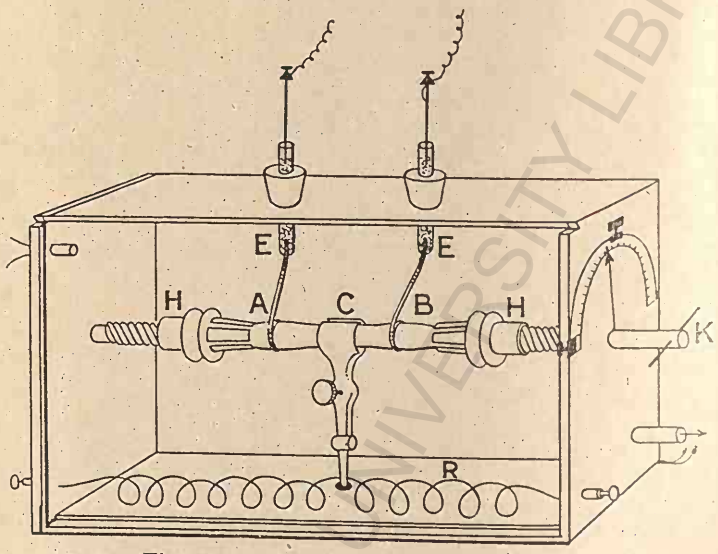



Fig. 37. — *Enceinte vitrée pour plantes.*

L'amplitude de la torsion qui détermine l'intensité de l'excitant est mesurée par le cercle gradué, à droite. La température de l'enceinte est réglée par le fil métallique R, chauffé électriquement. Pour étudier l'action des anesthésiques, on insuffle des vapeurs de chloroforme, dans l'enceinte, par le tube latéral.

que la rapidité du retour au zéro n'était propre qu'à certains individus.

TABLEAU INDIQUANT LE DÉCLIN DES RÉACTIONS AVEC L'ÉLÉVATION DE LA TEMPÉRATURE.

(0,01 volt = 35 divisions.)

| Températures. °C. | Réactions. div |
|---|---|
| 20 | 21 |
| 30 | 7,5 |
| 40 | 5,5 |
| 50 | 4 |
| 65 | 3 |

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Tandis que les réactions des radis cessaient complètement dès 55°, celles du céleri n'étaient pas encore abolies à 60°, ni même plus haut, et, cependant, à ces températures élevées, les temps des retours au zéro allaient en s'allongeant. Je compris vite la raison de cette apparente anomalie. Ici, nous expé-

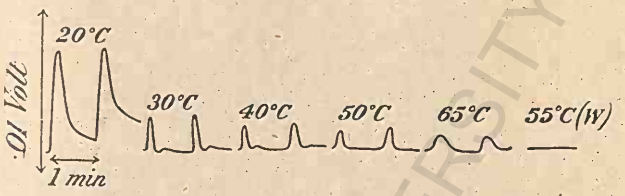



Fig. 38. — *Influence de la chaleur sur les réactions.*
Les réactions sont abolies par l'eau chaude à 55°.

rimentions avec une chaleur sèche, tandis que, dans les expériences précédentes, c'était avec de l'eau chaude. Or il est bien connu qu'aux bains turcs, par exemple, on peut supporter sans inconvénient les 100° de la chambre chaude, tandis qu'une immersion dans de l'eau à 100° serait fatale. Alors pour voir ce qu'en des circonstances analogues il adviendrait du pétrole de céleri, je l'enlevai de l'appareil, et le plongeai, pendant 5 minutes, dans de l'eau à 55°. Le diagramme, pris ensuite, montra que la plante était effectivement tuée (*fig.* 38, B).

**Accroissement des réactions, secondaire à une variation de température.** — Les variations de température ont souvent, en curieux effet second, un accroissement des réactions. Je l'ai remarqué, pour la première fois, dans une série d'observations, où les réactions étaient enregistrées pendant une élévation de la température, puis pendant sa descente (*fig.* 39). La température était réglée électriquement. L'inspection des diagrammes montre que, pour le même nombre de degrés centigrades (50°, 30°), les réactions étaient plus énergiques pendant la descente de la température que pendant son ascension. Tout se passe donc comme si la variation de température

accroissait la mobilité moléculaire, et, par là, favorisait les réactions.

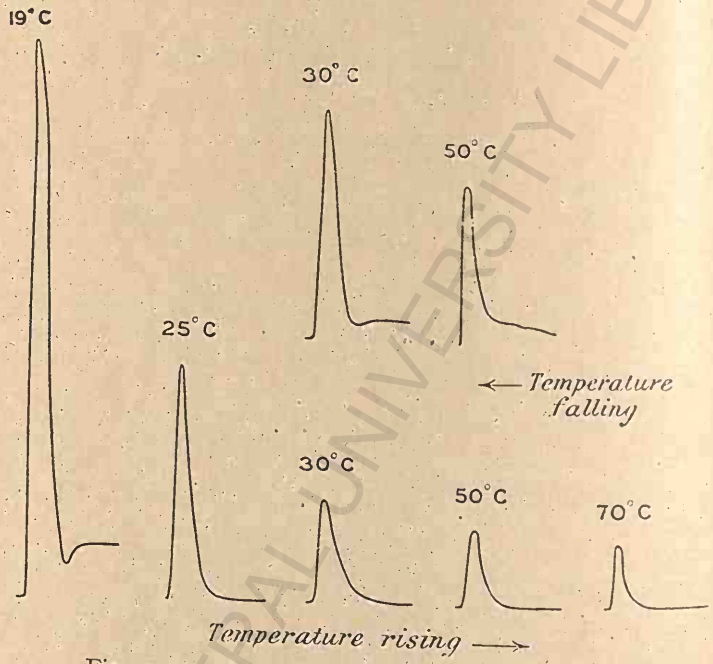



Fig. 39. — *Réactions du chou frisé (Scotch Kale) à des températures croissantes puis décroissantes.*

Les réactions enregistrées (*fig.* 40) sont celles d'un *Lis Eucharis*, pendant que la température s'élève, puis s'abaisse.

TABLEAU DES RÉACTIONS D'UN CHOU FRISÉ (SCOTCH KALE) PENDANT QUE LA TEMPÉRATURE MONTE, PUIS DESCEND.

| Températures. | Réactions à température ascendante. | Réactions à température descendante. |
|---|---|---|
| °C. | div | div |
| 19 | 47 | » |
| 25 | 24 | » |
| 30 | » | 23 |
| 50 | 8 | 16 |
| 70 | 7 | » |

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

Fig. 40. — *Diagramme des réactions d'un « Lis Eucharis » à des températures croissantes puis décroissantes.*

Excitant d'intensité constante, appliqué à intervalles d'une minute. Le passage du courant dans le fil métallique élève graduellement la température de l'enceinte. En interrompant le courant, la température s'abaisse graduellement.

Les températures correspondant à chaque réaction sont indiquées ci-dessous :

Températures croissantes : (1), 20°; (2), 20°; (3), 22°; (4), 38°; (5), 53°; (6), 68°; (7), 65°.

Températures décroissantes : (8), 60°; (9), 51°; (10), 45°; (11), 40°; (12), 38°.

(En abscisses, les temps).

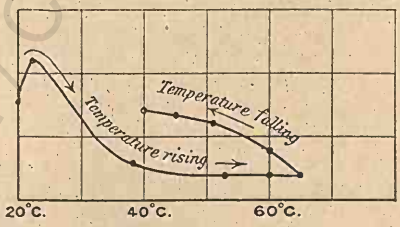



Fig. 41. — *Courbe de la variation des réactions de l' « Eucharis », pour des températures croissantes et décroissantes.*

(En abscisses, les températures.)

En portant en abscisses les températures, au lieu des temps, on a la courbe de la variation des réactions (*fig.* 41).

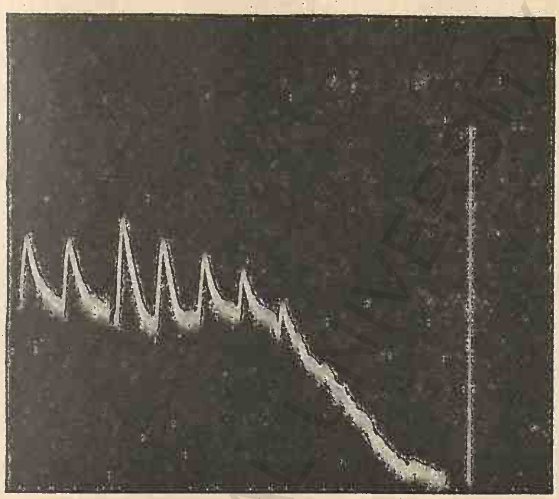
**Limite supérieure de température.** — Nous avons vu que les plantes sont inégalement sensibles au froid, et que les réactions du *Lis Eucharis* étaient abolies avant celles du Lierre et du Houx. Pour la chaleur, les phénomènes sont analogues. Ainsi les réactions du choux frisé (Scotch Kale) sont abolies par une immersion de 10 minutes dans de l'eau à 55°, tandis que, dans les mêmes conditions, celles du *Lis Eucharis* sont encore très nettes, et ne disparaissent qu'à 65°. Ceci tient probablement à ce fait que l'*Eucharis* est d'origine tropicale et est cultivé dans des serres relativement chaudes.

**Action de la vapeur bouillante.** — Enfin je me proposai d'enregistrer à intervalles réguliers, pour une soudaine élévation de température, toutes les réactions d'une plante, jusqu'à sa mort.

Je choisis une plante donnant des réactions bien régulières, et la montai dans l'enceinte vitrée, où l'on pouvait faire arriver de la vapeur bouillante. Au moment de l'introduction de la vapeur, se manifeste une augmentation momentanée de l'excitabilité. Mais celle-ci décline rapidement, et, au bout de 5 minutes, la plante était tuée, comme l'indique le diagramme (*fig.* 42).

**Remarque.** — Ce qui précède montre que l'influence des variations de température sur la vitalité des plantes a son expression précise dans leurs réactions électriques. On peut même dire qu'aucune autre méthode ne permet de déterminer d'une manière aussi satisfaisante le moment où la vie cesse. Car, d'ordinaire, nous ne pouvons nous rendre compte de la mort d'une plante que par des phénomènes indirects, lorsqu'elle commence à se flétrir, par exemple, tandis que les réactions électriques nous indiquent immédiatement quand la vie est interrompue, et elles nous permettent de préciser le point léthal, chose impossible à obtenir par tout autre moyen.

On peut, maintenant, faire remarquer l'erreur commise par Kunkel, lorsqu'il avançait que les réactions des plantes étaient dues au mouvement de l'eau dans leurs tissus. Si tel était le cas, en effet, l'application d'un excitant donné devrait



Avant. ↑ Après.

Fig. 42. — *Abolition des réactions par la vapeur bouillante.*

Les deux réactions de gauche correspondent à une température de 17° C. La chaleur produite par de la vapeur bouillante exalte d'abord les réactions. Mais au bout de 5 minutes, elle tue la plante, et abolit les réactions (Carotte).

L'excitant était une vibration de torsion de 30°, appliquée à intervalles d'une minute.

La ligne verticale représente 0,1 volt.

toujours être suivie par une réaction électrique déterminée, dont le signe et l'intensité seraient constants. Or nous trouvons, au contraire, que les réactions varient avec tout facteur qui modifie la vitalité de la plante. Ainsi l'amplitude des réactions est maxima pour l'intervalle de température le plus favorable à la vitalité, et quelques degrés de plus déterminent

une profonde dépression; les réactions s'annulent aux deux limites, inférieure et supérieure, de température, et retrouvent leur intensité lorsqu'on revient à l'intervalle optimum. Les anesthésiques et les toxiques abolissent les réactions. Les réactions changent de sens lorsque le tissu est fatigué, et tous ces phénomènes ne sauraient être expliqués par un simple déplacement d'eau dans les tissus.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

# CHAPITRE IX.

## RÉACTIONS DES PLANTES. EFFET DES ANESTHÉSIQUES ET DES TOXIQUES.

L'effet des anesthésiques est un « test » ou critère, du caractère vital des réactions. — Effet du chloroforme, du chloral, du formol. — Moyen de rendre les réactions indépendantes des variations de la résistance du tissu. — Avantage de la méthode du « block ». — Influence de la dose.

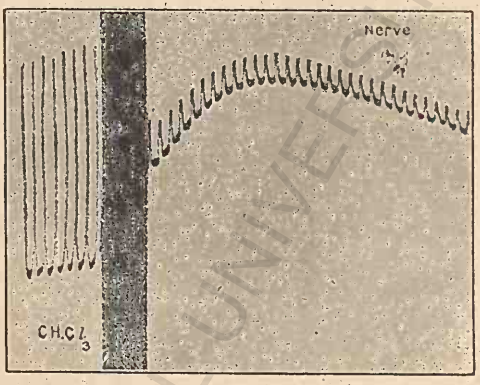
Pour reconnaître le caractère vital de phénomènes de réaction, les physiologistes admettent comme « test » ou critère principal l'effet des narcotiques et des poisons. Par exemple, tout le temps de la narcose d'un nerf, par le chloroforme, les réactions sont grandement réduites (*fig.* 43). De même, divers toxiques abolissent complètement les réactions : un nerf est tué par les caustiques alcalins et par les acides forts.

Nous avons déjà montré que des plantes, qui jusqu'alors présentaient des réactions énergiques, n'en donnaient plus du tout après l'application d'un anesthésique ou d'un toxique. Mais dans les cas en question, la dernière phase seule du phénomène était observée, et il nous a semblé important de pouvoir suivre les phases successives du développement d'une anesthésie ou d'une intoxication.

Toutefois, deux conditions devaient être réunies, et il ne semblait pas aisé de le faire.

La première était de trouver une plante qui, normalement, ne se fatiguât point, et qui pût donner des réactions constantes pendant un temps suffisamment long : les modifications immédiates, dues à l'application d'un agent chimique, deviendraient

ainsi évidentes. Avec un peu de peine, on peut, en effet, trouver des échantillons dont les réactions sont d'une régularité parfaite. Le diagramme (*fig.* 16) en témoigne. Il s'agissait d'un radis, que j'ai soumis pendant une demi-heure à des excitants d'intensité constante, espacés d'une minute, sans qu'il fût possible de déceler, dans ses réactions, la moindre variation. Naturellement, il est plus fréquent de rencontrer des échan-




Avant. ↑ Après.

Fig. 43. — *Effet du chloroforme sur les réactions des nerfs* (WALLER).

tillons dont les réactions sont régulières dans leur ensemble seulement, et qui présentent, dans le détail, de légères fluctuations périodiques. Mais même avec ceux-ci, l'application d'un agent chimique est suivie d'un effet trop soudain et trop marqué pour ne pas retenir l'attention.

Les résultats les plus satisfaisants sont donnés par des échantillons choisis de carottes et de radis, dont les réactions sont énergiques et d'amplitude constante. Pour les carottes, le meilleur moment est août et septembre, car ensuite leur sensibilité décline rapidement. Alors, on a les radis, qui présentent encore de bonnes réactions dans la première moitié de novembre, mais à qui l'apparition des premières gelées est très préjudiciable. Moins excellents, mais encore bons, sont les

pétioles de navet et de choux-fleur. Ils ont des réactions qui, dans leur ensemble, sont régulières, tout en présentant de curieuses alternances, à périodicité propre.

La seconde condition touchait le temps, limité, départi à un enregistrement photographique. Les effets produits par l'application d'agents chimiques se manifesteraient-ils assez vite ? Cela dépendait de la vitesse d'absorption des tissus et de la manière dont ils seraient impressionnés. J'eus heureusement la surprise de trouver qu'avec de bons échantillons, les effets se manifestaient au bout d'un temps assez court, une minute, ou à peu près.

**Effet du chloroforme.** — Dans toutes ces recherches sur les plantes, on se sert des mêmes procédés que pour les nerfs.

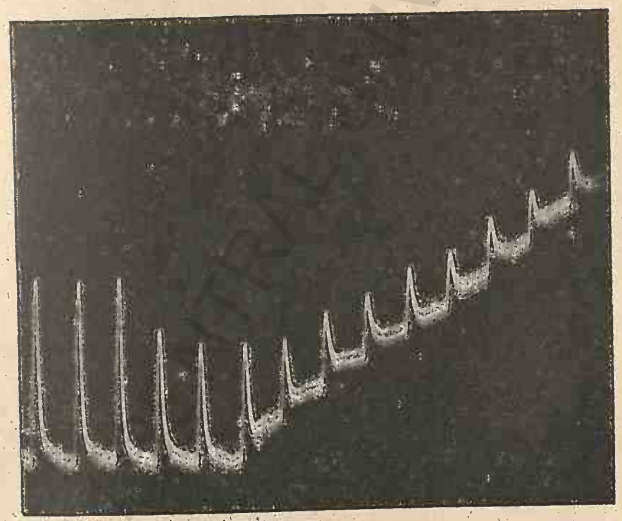



Fig. 44. — *Effet du chloroforme sur les réactions de la carotte.* Excitant : de minute en minute, une vibration de torsion de 25°.

Par exemple, on insuffle de la vapeur de chloroforme dans l'enceinte où est placée la plante, ou bien quand il s'agit de

l'action de corps liquides, on les applique aux points de contact A et B, et dans leur voisinage immédiat.

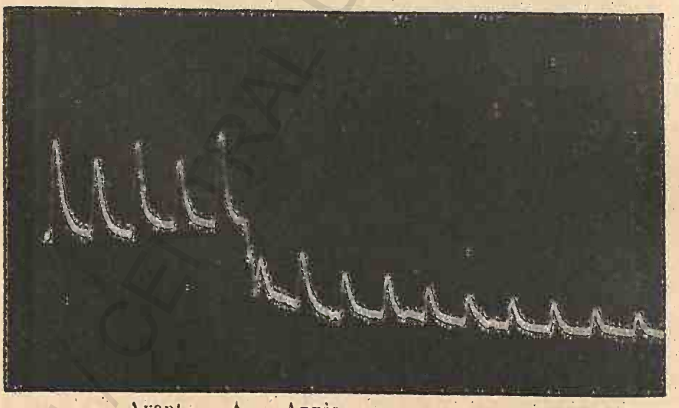
La plante étant placée dans l'enceinte (*fig.* 37), le mode opératoire est le suivant :

1° On applique, à intervalles réguliers d'une minute, un excitant d'intensité constante, et l'on enregistre photographiquement les réactions provoquées;

2° Sans interrompre l'opération, on insuffle de la vapeur de chloroforme. Et l'on voit avec quelle rapidité survient l'affaiblissement des réactions, et l'accentuation de cet affaiblissement, avec le temps (*fig.* 44).

On retrouve, avec les plantes, le même déplacement ascendant de la ligne des zéros, déjà observée pour les nerfs, dans les mêmes conditions. Ce point est d'ailleurs d'une importance secondaire, le fait essentiel étant la diminution des réactions.

**Effets du chloral et du formol.** — Je donne ici (*fig.* 45, 46)



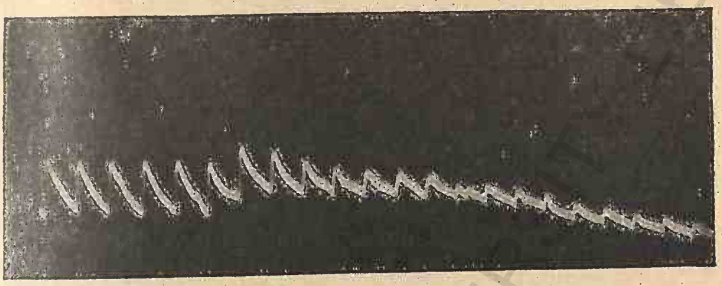
Avant. ↑ Après.

Fig. 45. — *Effet de l'hydrate de chloral sur les réactions d'un pétiole de chou-fleur.*

Excitant : de minute en minute, une vibration de torsion de 25°.

deux diagrammes, montrant, l'un, l'action du chloral, et l'autre celle du formol. Les deux substances étaient appliquées, en

solution, sur le tissu, aux deux principaux contacts, et sur les régions contiguës.



Avant. ↑ Après.

Fig. 46. — *Effet du formol* (*Radis*).

La petite fluctuation périodique des réactions normales (*fig.* 45) est intéressante. On notera le déclin brusque, très marqué, qui suit, au bout d'une minute, l'application du chloral.

**Procédé rendant les réactions du tissu indépendantes des variations de sa résistance.** — Pour mieux mettre en évidence le phénomène principal, nous avons différé jusqu'ici de parler d'une petite difficulté que rencontrent les expériences.

Une modification de l'excitabilité d'un tissu (ici, sous l'influence d'un agent chimique) se caractérise, à nos yeux, par l'accroissement ou l'affaiblissement des réactions électriques, rendus manifestes par les déviations du galvanomètre. Si la résistance de tout le circuit est constante, il est clair qu'une déviation du galvanomètre révèle une variation de la réaction électrique, lié à une modification de l'excitabilité, modification due à l'application de l'agent chimique. Mais la présence de cet agent pourrait modifier la résistance du tissu, et le galvanomètre indiquerait alors une variation, qui ne serait pas due à une réaction électrique. Ou encore, la variation indiquée par le galvanomètre pourrait être la résultante de deux variations : une variation inconnue de la résistance du circuit et la variation propre de la réaction électrique.

On pourrait cependant déterminer à quel point la variation observée est due à un changement de résistance du tissu, en envoyant dans le galvanomètre, avant et après l'application de la substance chimique, une petite force électromotrice déterminée, et en comparant les déviations correspondantes. Si les deux déviations sont égales, nous savons que la résistance du tissu n'a pas varié. Si elle a varié, la différence des déviations nous indiquera de combien, et nous pourrons en tenir compte dans nos résultats.

Mais nous avons adopté une autre manière de faire, grâce à quoi toute correction est évitée, les déviations du galvanomètre indiquant cette fois des variations, indépendantes de toute modification de la résistance du tissu. Ceci s'obtient en interposant dans le circuit une résistance constante très grande, qui rend négligeables toutes les autres. Un exemple éclaircira ceci. J'ai pris une carotte et trouvé que la somme de sa résistance et de celle des électrodes impolarisables était de $2.10^4$ ohms. La présence d'un agent chimique réduisait cette résistance à $19.10^3$ ohms. La résistance du galvanomètre était de $10^3$ ohms. On interposait une résistance extérieure de $10^6$ ohms. La variation de résistance dans le circuit, due à l'action chimique, était donc de $10^3$ ohms, pour une résistance globale de

$$10^6 + 19.10^3 + 10^3 \text{ ohms},$$

soit de $\frac{1}{1020}$. Par conséquent, la variation de la déviation galvanométrique due au changement de la résistance devenait inférieure à un millième (voir *fig.* 49).

**Avantages de la méthode du « block ».** — Nous avons employé, pour ces recherches, la méthode du « block » (*fig.* 37), de préférence à celle de la « variation négative » en raison des avantages suivants :

Dans la méthode de la variation négative, l'un des contacts étant lésé, les substances chimiques que l'on appliquerait ensuite aux deux contacts les affecteraient inégalement, et la différence de potentiel résiduelle pourrait en être modifiée. Or la valeur de la réaction provoquée ici dépend précisément

de cette différence résiduelle initiale. Par conséquent, avec cette méthode (de la variation négative), il serait possible que des modifications observées dans les réactions fussent dues à des variations de la différence résiduelle initiale, et non à l'application, stimulante ou déprimante, d'un agent chimique.

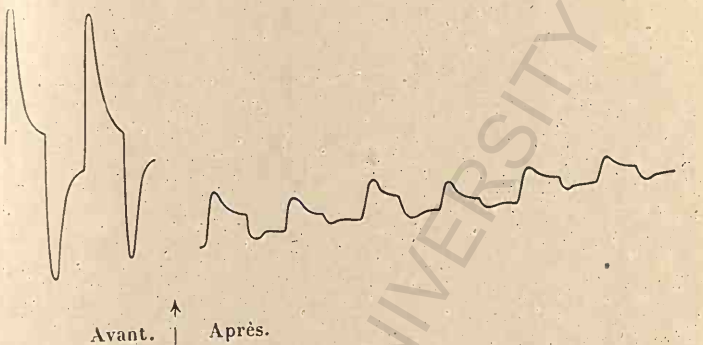



Fig. 47. — *Abolition des réactions, aux deux extrémités* A *et* B *d'un pétiole, par application de* Na OH.

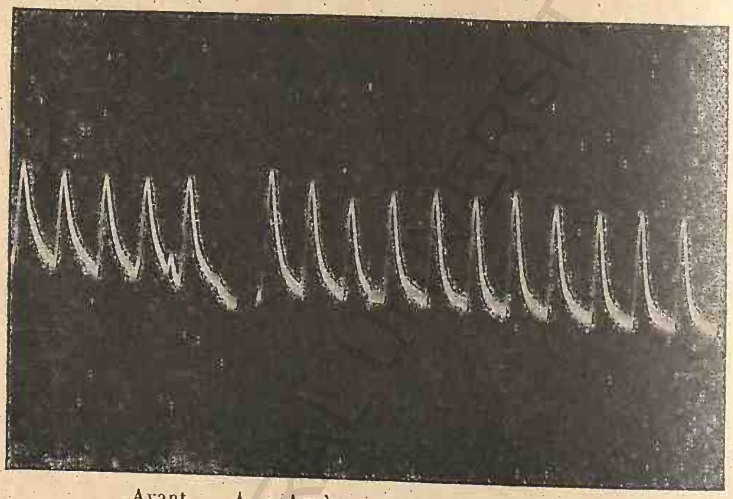
Excitant : de minute en minute, une vibration de torsion de 30°, donnée à A et à B, alternativement.
Les réactions ont été complètement abolies au bout de 24 minutes.

Dans la méthode du block, au contraire, les deux contacts sont intacts. Ils se comportent donc de la même manière, et sont pareillement affectés par l'application d'un agent chimique. Dès lors, on est certain que les modifications observées dans les réactions sont bien dues à l'agent appliqué, et non à une circonstance fortuite.

De plus, si l'on désire procéder à un contrôle des effets obtenus, il suffit d'exciter alternativement les extrémités A et B : toutes deux indiqueront la modification produite. Je donne ici le diagramme des réactions des deux extrémités d'un pétiole de navet, excitées alternativement, comme il vient d'être dit. Le pétiole était légèrement conique, et de là provient la très légère différence accusée par les réactions de l'une et de l'autre extrémité. L'excitant, égal pour les deux, était

l'application de quelques gouttes d'une solution de Na OH, à 10 pour 100. On voit combien les réactions étaient rapidement abolies (*fig.* 47).

**Influence de la dose.** — Dans les expériences sur l'action des substances chimiques, on voit parfois les petites doses



Avant. Après.

Fig. 48. — *Action toxique d'une solution très diluée de* KOH.

être toniques, alors que les hautes doses sont toxiques. Le diagramme (*fig.* 48) montre l'effet légèrement stimulant d'une solution très diluée de KOH, tandis que la figure 49 montre, au contraire, l'abolition complète des réactions, par application de la même substance, mais à dose plus élevée.

**Remarque.** — Les effets des anesthésiques et des toxiques sont, avons-nous rappelé, admis en physiologie comme critérium du caractère « vital » des phénomènes de réaction. En nous référant à ce critérium, on voit que les réactions élec-

triques des plantes satisfont aux conditions requises pour être « vitales ».

Avant. ↑ Après.

Fig. 49. — *Abolition presque totale des réactions par application de* KOH *concentrée.*

Les deux lignes verticales correspondent aux déviations du galvanomètre pour 0,1 volt. On notera que la résistance totale n'a pas varié.

Dans les Chapitres précédents, nous avons trouvé que la réaction par variation négative, la présence ou l'absence de fatigue, les relations entre l'excitant et la réaction, l'influence, sur les réactions, des températures hautes et basses, et jusqu'aux réactions anormales, telles que les réactions positives d'un tissu fatigué, étaient les correspondants exacts des phénomènes présentés, dans les mêmes conditions, par les tissus animaux. Restait le dernier « test », l'influence des agents chimiques. Avec lui, nous avons achevé d'établir le parallèle complet entre les réactions des tissus végétaux, et celles des tissus animaux.

# CHAPITRE X.

## RÉACTIONS DES MÉTAUX.

Peut-on trouver des réactions aux substances inorganiques ? — Expériences sur l'étain, par la méthode du « block ». — Réactions par la méthode de la dépression. — Réactions par la méthode de l'exaltation.

Nous avons vu que l'expression électrique de la vie n'est pas exclusive aux animaux, mais que les plantes, également, la possèdent. Nous avons vu comment les réactions électriques sont les indices de la vitalité de la plante, parce que les mêmes causes, exactement, ralentissent, abolissent temporairement, ou abolissent définitivement les premières et la dernière. Ainsi, les tissus vivants, animaux et végétaux, voient, dans les mêmes conditions, leur excitabilité se manifester, disparaître, et être capable de revenir, ou non.

Comme nous l'avons dit, les réactions électriques des animaux ont été considérées jusqu'ici comme un phénomène purement physiologique. De notre côté, nous avons prouvé, de diverses manières, que les réactions électriques des plantes ont exactement le même caractère.

Enfin nous avons rappelé que, par phénomènes physiologiques, on entendait, assez généralement, ceux dont on ne connaissait aucune explication physique, et que l'on supposait résulter du jeu d'une force vitale inconnue, résidant au sein des matières vivantes, et dont l'une des manifestations est, précisément, de réagir électriquement à un excitant.

BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY

**Peut-on trouver des réactions aux matières inorganiques ?** [1]. — Nous allons maintenant examiner ce qu'il y a de vrai dans le caractère hyperphysique attribué à ces phénomènes. Pour cela, nous appliquerons aux matières inorganiques un excitant, et nous regarderons si elles présentent le mode électrique

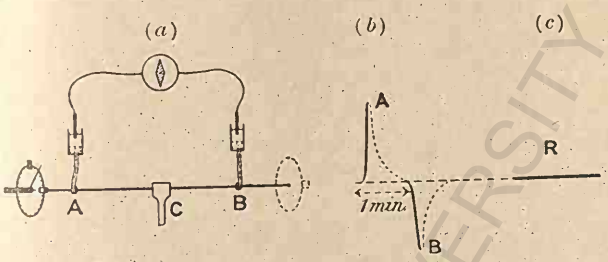



Fig. 50. — *Réactions électriques des métaux.*

(*a*) Méthode du « block ».
(*b*) Réactions égales et opposées, provoquées en excitant respectivement A ou B.
(*c*) Effet nul, ou équilibre, lorsque les deux extrémités sont excitées simultanément.
Les portions de courbe, pointillées, indiquent les retours au zéro.

de réaction, qui a été considéré comme spécifique à la matière vivante. *Et nous emploierons exactement les mêmes appareils et les mêmes excitants qui ont servi pour les plantes, en nous bor-*

---

[1] En suivant une autre ligne de recherches, j'ai obtenu, de la part de matières organiques, des réactions à un excitant électrique, en me servant de la méthode de la « variation de la conductivité » [*voir* « De la généralité des phénomènes moléculaires produits par l'électricité sur la matière inorganique et sur la matière vivante » (*Travaux du Congrès international de Physique*, Paris, 1900); et aussi « Similitude des effets produits par un excitant électrique sur les substances inorganiques et sur les matières vivantes » (*British Association*, 1900; voir *Electrician*)].

Dans les Chapitres suivants, pour mettre en évidence le parallélisme complet qui existe entre les réactions de la matière inorganique et celles de la matière vivante, je me suis servi de la méthode de la variation électromotrice employée par les physiologistes.

BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY

*nant à substituer, à la tige végétale, une tige de métal, par exemple d'étain* (*fig.* 50). Un métal quelconque pourrait d'ailleurs être pris aussi bien que l'étain.

**Expérience sur l'étain. Méthode du « block ».** — Prenons un fil d'étain (1), dont toutes les déformations moléculaires ont été préalablement annulées par le recuit, et fixons-le dans la pince à vis de l'appareil, C (*fig.* 50). Si les déformations ont été réellement annulées, A et B seront isoélectriques, et aucun courant ne passera dans le galvanomètre. Si A et B ne sont pas identiques, un courant minime parcourra le circuit. Mais il s'ajoutera algébriquement au courant de réaction, et ne changera rien aux conclusions de l'expérience.

Cela étant, si l'on excite A par des chocs ou par des vibrations de torsion, un courant temporaire de réaction parcourt le fil, de B en A, du point non excité vers le point excité, et retournera, par le galvanomètre, du point excité au point non excité.

Un excitant appliqué en B eût donné lieu à un courant de sens inverse.

**Expérience sur l'équilibre des réactions.** — Si le fil a été soigneusement recuit, l'état moléculaire de ses différentes parties est à peu près le même. Prenons un tel fil, et mettons, entre les mors de la pince, son centre, ou point d'équilibre, qui est son milieu, ou qui est tout contre ce milieu. Une rapide vibration de torsion, de 90°, appliquée en A, provoquera une déviation ascendante du galvanomètre. Le même excitant, appliqué en B, provoquera une déviation égale et descendante. Si, alors, les deux extrémités A et B sont excitées en même temps, les deux réactions étant égales et de signe contraire se feront équilibre, et le spot du galvanomètre restera immobile (*fig.* 50, A, B, R). Et l'équilibre sera maintenu, même en enle-

(1) Par *étain*, il faut entendre, ici, l'alliage de plomb et d'étain, dont on fait les fusibles pour installations électriques.

vant la pince de serrage, et en excitant le fil dans toute sa longueur.

Il faut se rappeler que, pour une longueur de fil constante, l'intensité de l'excitant croît avec l'amplitude de la torsion. D'autre part, pour un angle de torsion constant, l'intensité de l'excitant croît avec la diminution de longueur du fil. Si donc le serrage est disposé en un point du fil situé entre le point d'équilibre et A, les deux vibrations de torsion de 90°, appliquées l'une en A et l'autre en B, auront une réaction résultante ascendante, montrant que la réaction de A est plus vigoureuse que celle de B. Alors, sans toucher au reste du dispositif de l'expérience, en plaçant la pince sur le fil, progressivement, depuis tout à gauche jusqu'à tout à droite, en passant par le centre de l'équilibre, nous aurons successivement des réactions résultantes positives, nulles, puis négatives.

Avec l'étain, le courant de réaction va du point moins excité au point plus excité. Dans la rétine, le courant de réaction va dans le même sens, et comme là on le considère comme une réaction positive, nous considérerons aussi les réactions normales de l'étain comme positives.

Et de même que les réactions de la rétine ou des nerfs peuvent, sous certaines conditions moléculaires, subir un « renversement », c'est-à-dire changer de signe, de même les rédactions d'un fil métallique peuvent aussi présenter des renversements.

**Anomalies de la terminologie actuelle.** — Lorsqu'il n'y a aucun courant de lésion, un courant de réaction peut difficilement être appelé *variation* positive ou négative. Une telle dénomination serait arbitraire, et prêterait à confusion, comme nous allons le montrer. Une terminologie mieux définie, exempte d'ambiguïté, consisterait, ainsi qu'il a déjà été dit, à regarder, dans un tissu ou un fil de métal, un courant comme positif lorsqu'il va du point moins excité au point plus excité, et comme négatif, en cas contraire.

Ainsi, dans un fil d'étain, l'extrémité excitée A devient zincoïde, c'est-à-dire que le courant de réaction, dans l'électrolyte (électrodes impolarisables et galvanomètre interposé),

va de A en B, tandis que *dans le fil* il va de B, moins excité, vers A, plus excité. Inversement, si c'est B qu'on excite, le courant de réaction va en sens inverse. Cette forme positive de la réaction est la plus fréquente; mais il y a des cas où la réaction est négative.

Pour montrer que, normalement, une tige métallique réagit à un excitant en devenant zincoïde (et aussi pour montrer les dangers d'une dénomination aussi peu définie que celle de « variation négative »), j'ai disposé l'expérience suivante (*fig.* 51). Prenons une barre métallique, formée par la réunion

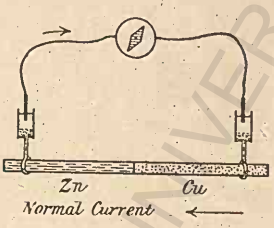



Fig. 51. — *Courant de réaction allant vers l'extrémité excitée.*

1° En excitant Cu, courant de réaction →; et diminution de la différence normale de potentiel : (0,85 — 0,009) volt.

2° En excitant Zn, courant de réaction ←; et différence normale de potentiel, accrue : (0,85 + 0,013) volt.

de deux barrettes égales, l'une de Zn, et l'autre de Cu, avec la pince à serrage en son milieu, de manière qu'une perturbation appliquée à l'une des extrémités ne puisse atteindre l'autre, et relions les deux extrémités à un galvanomètre, par deux électrodes impolarisables, comme l'indique la figure. Dans ces conditions, le courant, dans l'électrolyte (électrodes impolarisables et galvanomètre interposé), circulera de gauche à droite. Rappelons-nous qu'au point de vue électrique, un métal excité se rapproche du comportement du Zn. En appliquant une vibration de torsion à l'extrémité de Cu (qui, bien que cuivre, tendra à devenir zincoïde), la différence de potentiel entre Zn et Cu diminuera, et, par conséquent, diminuera aussi le courant qui passe dans le circuit. Mais si c'est l'extrémité de Zn

qui est excitée, la différence de potentiel sera accrue, et le courant également.

Dans l'expérience particulière, indiquée par la figure 51, il y avait, entre le Zn et le Cu, une différence de potentiel de 0,85 volt. Avec un potentiomètre et un montage en « opposition », le spot du galvanomètre était ramené au zéro. Une vibration de torsion, appliquée au zinc, provoquait une déviation du spot de 33 divisions, dans le sens d'une force électromotrice *accrue*. En cessant l'excitation, le spot revenait au zéro. Le même excitant, appliqué au Cu, provoquait une déviation du spot de 23 divisions, mais en sens inverse, c'est-à-dire dans le sens d'une *diminution* de la différence de potentiel. Cette variation temporaire disparaissait par la cessation de l'excitant.

De plus, en envoyant dans le circuit une force électromotrice connue, et en observant la déviation correspondante du spot, on avait une référence pour évaluer les déviations précédentes.

On trouvait ainsi que l'excitation du Zn provoquait un accroissement de la différence de potentiel de $\frac{15}{1000}$ tandis que l'excitation du Cu provoquait une diminution de cette différence de $\frac{11}{1000}$. Or, suivant l'ancienne terminologie, la réaction due à l'excitation du Zn eût été regardée comme une variation positive, et celle du Cu comme négative. Et pourtant ces réactions ne sont point d'essence opposée, puisque, dans les deux cas, le courant de réaction parcourt la barre en allant vers le point le plus excité. C'est pourquoi il est préférable d'employer les termes de *positif* et *négatif* dans la signification que nous avons suggérée, c'est-à-dire : positif, lorsque le courant se dirige vers le point le plus excité, et négatif en cas contraire. Et la méthode du « block » est, ainsi que nous l'avons déjà montré, la meilleure pour l'étude de ces réactions.

Dans l'expérience indiquée par la figure 50, si la vis de serrage est enlevée, et qu'on applique une percussion, au fil, en son milieu, l'onde de perturbation provoquée se propage et gagne A et B. Cette perturbation mécanique et la perturbation électrique concomitante, après avoir atteint, en ces points, une certaine valeur maxima, s'amortiront peu à peu. En désignant par $E_A$ et $E_B$ les variations électriques produites en A

et B par l'excitation, l'effet résultant, dans le galvanomètre, sera celui de $E_A - E_B$.

Cet effet résultant sera nul, ou non :

1° Il sera nul, si les variations électriques en A et B se font constamment équilibre, en ce qui arrivera : (*a*) si la perturbation provoquée arrive en A et B au même moment, avec la même intensité; (*b*) si en A et B l'état moléculaire est le même; (*c*) si en ces deux points les vitesses d'établissement et d'amortissement de l'excitation sont les mêmes.

2° L'effet résultant ne sera pas nul, si l'on s'est arrangé pour que la perturbation engendrée atteigne l'une seulement des extrémités de la barre, et non l'autre : par exemple, A, et non B, ou l'inverse. Ceci a été obtenu par la vis de serrage, dans la méthode du « block ».

Mais une réaction différencielle [1] peut encore être obtenue même lorsque la perturbation atteint à la fois A et B, si l'excitabilité électrique de l'un des deux points est déprimée ou exaltée par un moyen quelconque physique ou chimique.

Au Chapitre XVI, nous étudierons en détail l'action des agents chimiques sur l'excitabilité d'un métal. Mais dès maintenant nous envisagerons les deux nouveaux moyens permettant d'obtenir une réaction : par dépression unilatérale ou « relative »; et par exaltation relative.

**Réactions électriques par dépression unilatérale de l'excitabilité; ou méthode de la dépression.** — On pourra donc provoquer des réactions, dans un fil de métal, sans avoir recours au « block », en déprimant au préalable ou en abolissant l'excitabilité de l'une de ses extrémités, grâce à l'application convenable d'agents chimiques (telle, la méthode de la lésion). Après quoi, le fil peut être excité dans toute sa longueur, et l'on recueillera une réaction, résultant de la différence entre les excitabilités des deux extrémités.

---

(1) *Voir* note (1), page 34.

On prend donc un fil d'étain, et un contact ordinaire est établi en A (petite bande d'étoffe, imbibée d'eau pure, ou d'une solution saline très diluée). L'excitabilité de B est déprimée par l'application de quelques gouttes de potasse caustique ou d'acide oxalique. L'application du dernier produit engendre une minime différence de potentiel entre A et B, qui produira un léger déplacement du zéro du galvanomètre. Par un potentiomètre et un montage en opposition, on peut d'ailleurs

Fig. 52. — *Réactions par dépression unilatérale de l'excitabilité.*

Lorsqu'on excite le fil entier, un courant de réaction le parcourt allant vers le point le plus excitable.

(*a*) A est un contact ordinaire; B a été déprimé par de l'acide oxalique. Le courant de réaction va vers l'extrémité la plus excitable A.

(*b*) Le même fil. Mais on déprime A par de l'acide oxalique, et un contact ordinaire est établi en un nouveau point intact B', pris à gauche de l'ancien contact B. Le courant de réaction, provoqué par l'excitant, va maintenant de A vers B'.

ramener le spot au zéro initial. Mais le déplacement de ce zéro n'affecte pas le résultat général, car un excitant mécanique provoquera une réaction électrique temporaire, qui s'additionnera algébriquement avec la petite force électromotrice existant déjà. Alors, la déviation du spot se fera à partir du nouveau zéro, et c'est à celui-ci que reviendra le spot, lors de la remise en état du fil. Et en effet, en excitant le fil entier (par vibration de torsion), un courant de réaction est engendré, qui parcourt le fil, en allant vers le point le plus excitable, soit, d'après les dispositions indiquées, de B en A [*fig.* 52 (*a*)].

Le même fil peut servir à l'expérience inverse, qui confirmera le résultat précédent. On établit un contact ordinaire (avec de l'eau, ou une solution saline, faible), en B′, à gauche de B. Puis on déprime l'excitabilité de A par de l'acide oxalique. En excitant le fil entier, on verra le courant de réaction se propager en sens inverse, de A en B′, c'est-à-dire toujours du point le moins excitable vers le point le plus excitable [*fig.* 52 (*b*)].

Ces expériences montrent que, dans un même fil de métal, le courant de réaction circule, suivant les conditions de l'expérience, tantôt dans un sens, et tantôt dans un autre, mais toujours en accord avec la théorie indiquée.

**Réactions électriques par exaltation unilatérale de l'excitabilité; ou méthode de l'exaltation.** — Les résultats précédents sont confirmés avec plus de force encore par le procédé réci-

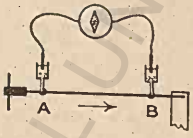



Fig. 53. — *Méthode de l'exaltation unilatérale de la sensibilité.*
Le contact B est rendu plus excitable par l'application d'un stimulant chimique $Na^2 CO^3$.
Le courant de réaction va vers le point le plus excitable B.

proque, qui consiste à exalter l'excitabilité de l'un des contacts. Ceci se fait en touchant l'un des contacts, par exemple B, avec un corps tel que $Na^2 CO^3$ qui exalte l'excitabilité électrique. En excitant ensuite le fil, le courant de réaction provoqué va vers le point le plus excitable B (*fig.* 53).

La figure suivante (*fig.* 54) donne quatre diagrammes, qui explicitent nettement quelles réactions sont obtenues par les méthodes de la dépression ou de l'exaltation relatives.

En (*a*), B est touché avec le composé stimulant $Na^2 CO^3$. Un courant permanent parcourt le fil, allant de A vers B. Un excitant (mécanique ou autre) appliqué ensuite à tout le

fil, provoque un courant de réaction, de même sens (variation positive).

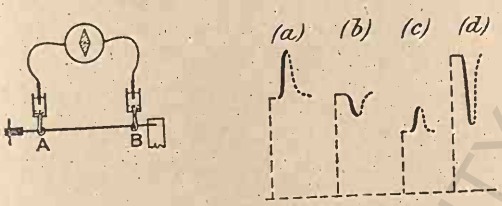



Fig. 54.

| | Courant permanent. | Courant de réaction. | Variations manifestées (signe). |
|---|---|---|---|
| (*a*) B est traité par le carbonate de sodium..... | → | → | positives |
| (*b*) B est traité par l'acide oxalique..... | → | ← | négatives |
| (*c*) B est traité par la potasse très diluée..... | → | → | positives |
| (*d*) B est traité par la potasse concentrée..... | → | ← | négatives |

Le courant de réaction va toujours vers le point le plus excité.

N. B. — La courbe de réaction est ascendante lorsque B est le point le plus excitable. La courbe de réaction est descendante lorsque A est le point le plus excitable. Les courbes en pointillé rond correspondent aux déviations du spot dues au courant permanent.

En (*b*), B est touché avec une trace d'acide oxalique, déprimant. Le courant permanent ainsi engendré est de même sens que le courant permanent précédent. Mais, pour un excitant appliqué au fil entier, le courant de réaction est de sens inverse (variation négative).

En (*c*), on touche B avec une solution, très diluée, de KOH. Si l'on excite le fil, la variation provoquée est positive.

En (*d*), on touche B avec une solution concentrée de KOH. Un excitant appliqué au fil provoque une variation négative.

BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY

Les deux derniers résultats paraissent anormaux. En réalité, ils sont dus au fait, qui sera démontré plus tard, qu'une dose faible de KOH est un stimulant ou exaltant, tandis qu'une forte dose de ce corps est un déprimant.

En résumé, on peut mettre les réactions en évidence :

1° par la méthode du « block »;

2° par la méthode de la lésion, en déprimant l'excitabilité de l'un des deux contacts;

3° par la méthode inverse, en exaltant l'excitabilité de l'un des deux contacts.

Et, dans chacun des cas, on provoque un courant de réaction, positif, pour l'étain, c'est-à-dire allant toujours vers le point le plus excité.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

# CHAPITRE XI.

## RÉACTIONS INORGANIQUES. MODIFICATIONS APPORTÉES AUX APPAREILS POUR ÉTUDIER LES RÉACTIONS DES MÉTAUX.

Conditions pour obtenir des mesures quantitatives. — Modification de la méthode du « block ». — Boîte ou « cellule » à vibration de torsion. — Application de l'excitant. — Graduation de l'intensité de l'excitant. — La réaction électrique est due à une perturbation moléculaire. — Test-expérience. — Boîte ou « cellule » voltaïque, à perturbation moléculaire.

Nous avons donc vu que les métaux réagissent électriquement à un excitant, exactement comme les tissus animaux et végétaux.

Il faut maintenant examiner si l'analogie s'arrête là, ou continue plus loin : si les courbes de réaction des matières vivantes et non vivantes sont toutes pareilles, et si elles peuvent être pareillement influencées par des actions du dehors. Puis, quels seront, sur la matière inorganique, les effets de la « superposition » des excitants ? Si de la fatigue peut se manifester ? Si oui, comment en seront affectées les courbes de réaction ? Et, enfin, les réactions des métaux peuvent-elles être stimulées, ou déprimées, par l'application d'agents chimiques ?

**Conditions pour obtenir des mesures quantitatives.** — Afin de mener à bien ces recherches, il est nécessaire d'écarter toute incertitude, et d'obtenir des mesures quantitatives. Ceci ne pouvait aller sans maintes difficultés, mais celles-ci furent surmontées en modifiant l'expérience.

Le dispositif décrit au Chapitre précédent convient surtout

à une étude quantitative des réactions des métaux. Si l'on avait à faire des expériences successives, les résultats ne pourraient être comparables que sous les conditions suivantes :

1° La résistance du circuit doit pouvoir rester constante. Ceci entraîne des précautions à prendre pour rendre les contacts électrolytiques absolument invariables, et pour éviter tout risque de déplacement.

2° Il faut trouver le moyen d'appliquer des excitants d'intensité rigoureusement égale.

3° Il faut, éventuellement, pouvoir graduer exactement les intensités, croissante ou décroissante, de l'excitant.

**Modification de la méthode du « block ».** — Toutes ces conditions peuvent être remplies, et un appareil parfaitement adapté à la nouvelle recherche peut être construit, en modifiant la méthode du « block ». Avant toute autre chose, on devra veiller à ce que le « block », établi au milieu du fil, empêche effectivement toute perturbation, appliquée à l'une des moitiés, de gagner l'autre, et à ce que les contacts soient parfaits en tous points.

La figure 55 rappelle, en (*a*), le schéma de l'appareil initial. Elle indique, en (*b*), une première modification : le fil AB est placé dans un tube en U, et est fixé en son milieu, par un bouchon, ajusté et forcé. De la paraffine fondue est coulée dans la partie cintrée du tube. On remplit d'eau les deux branches du tube, jusqu'à ce que les extrémités A et B soient complètement immergées. Le lien avec les électrodes non polarisables se fait par deux ajutages latéraux. Des torsions peuvent être données à A ou à B, à l'aide de deux pinces à poignée, visibles au-dessus de A et de B.

En remplissant d'eau les deux branches verticales du tube, on assure un contact parfait et invariable, meilleur qu'avec les bandes d'étoffe du dispositif ancien, en même temps que l'on supprime, *ipso facto*, tout déplacement, ou tout autre variation de surface.

En ce nouveau dispositif (*b*), si, par la poignée d'ébonite,

on donne une vibration de torsion à A, un courant de réaction parcourt le fil, de B en A, c'est-à-dire allant vers le point le plus excité, et retourne, par le galvanomètre, de A en B.

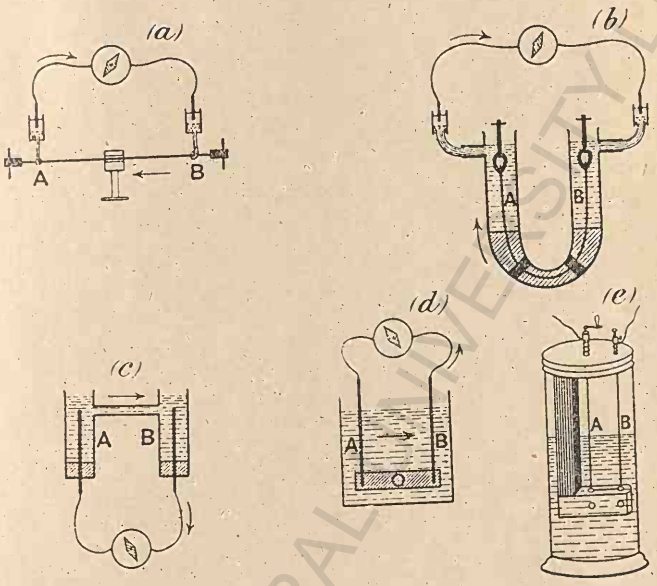



Fig. 55. — *Modifications successives de la méthode du « block », depuis le « fil rectiligne » jusqu'à la forme « cellule ».*

Lorsqu'on excite A, un courant de réaction parcourt le fil, allant du point moins excité B au point plus excité A. On notera que, malgré la direction invariable du courant de réaction, la déviation du galvanomètre sera, en (*d*), opposée à celle de (*b*).

La modification suivante, (*c*), consiste à séparer, des contacts électrolytiques, le galvanomètre, et à le brancher sur la partie métallique du circuit. Pour cela, on a ménagé une solution de continuité, indiquée par la figure, et l'on ferme le circuit par l'électrolyte. Alors, une vibration de torsion donnée à A provoque un courant de réaction, qui parcourt le circuit et, en même temps, le galvanomètre interposé, de B vers A. Le sens du cou-

rant est le même que dans le cas précédent, mais les nouvelles connexions du galvanomètre entraîneront pour la déviation de son aiguille un sens inverse de celui qu'elle avait précédemment.

Le dispositif suivant, (*d*), consiste simplement, sans changer les connexions, à intervertir le bas et le haut de l'appareil. A et B sont maintenant parallèles et verticaux, dans un bain électrolytique (eau ordinaire). Une vibration mécanique peut être donnée à A, sans affecter B, et *vice versa*.

Enfin, le schéma (*e*) représente l'appareil définitif. Deux fragments du même fil métallique sont fixés, à leur extrémité inférieure, par des vis d'ébonite, dans une pièce d'ébonite en forme de L. A leur partie supérieure, ils sont maintenus uniformément et modérément tendus par deux ressorts à boudin, et se continuent par deux électrodes, conduisant au galvanomètre. La poignée, par quoi sont données les vibrations de torsion, peut s'adapter à l'un ou à l'autre fil tendu. L'amplitude de la torsion est mesurée par un cercle gradué.

De tout ceci, il résulte que :

1° La « cellule » représentée en (*e*) est, dans son essence, identique au dispositif (*a*) ;

2° Les fils de (*e*), étant immergés dans l'électrolyte à une profondeur déterminée, il y a un contact parfait et invariable entre eux et lui, et toute difficulté provenant d'une variation éventuelle des contacts est supprimée ;

3° Les fils A et B ayant leurs extrémités inférieures fixées indépendamment l'une de l'autre, une vibration de torsion donnée, par la poignée, à l'un d'eux, n'affectera l'autre en rien. Un tel excitant, appliqué à A, provoque un courant de réaction d'un certain sens. Donné à B, il provoque une réaction de sens inverse. Nous avons ainsi le moyen de contrôler toutes les expériences, en provoquant les effets inverses. Et lorsque les deux fils sont en même condition moléculaire, par recuit et tension, les valeurs absolues de leurs réactions, pour une même intensité de l'excitant, sont toujours égales (*fig.* 56).

D'ordinaire, j'interpose dans le circuit extérieur une résistance, qui, suivant l'excitabilité du fil, peut varier de 1 à 5 mégohms. Dans la cellule, la résistance de l'électrolyte est

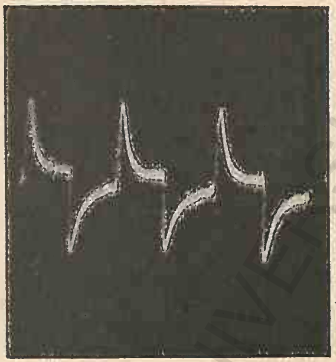


Fig. 56. — *Réactions de* A *et de* B, *égales et opposées.*

relativement faible, et les déviations du galvanomètre sont proportionnelles aux variations de la force électromotrice. Il est toujours bon d'interposer ainsi une résistance élevée, non seulement pour éviter que le spot ne sorte du champ gradué, mais pour éliminer les minimes perturbations accidentelles.

**Graduation de l'intensité de l'excitant.** — Une rapide vibration de torsion, donnée en A ou en B, provoque une réaction électrique. Pour un même angle de torsion, les réactions successives d'une matière telle que l'étain, qui ne se fatigue pratiquement pas, sont identiques. Lorsque croît l'amplitude de la torsion, celle des réactions croît également (*voir* Chap. XV). L'amplitude de la torsion est mesurée à l'aide d'un cercle gradué (*fig.* 57). Un index, lié à la poignée qui imprime la torsion, se meut entre deux butées *s* et *s'*, dont l'une est au zéro de la graduation, et dont l'autre peut être fixée où il convient.

On peut ainsi appliquer des intensités de l'excitant déterminées, égales, ou graduées à volonté.

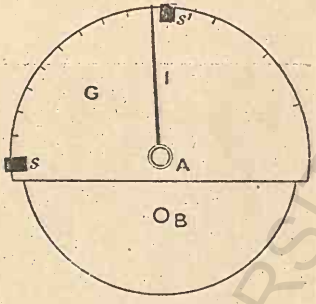



Fig. 57. — *Schéma du couvercle de la « cellule » à vibration de torsion.*

L'amplitude de la torsion est déterminée par les butées *s* et *s'*, que l'on fixe à la périphérie du cercle gradué G. L'index se meut d'une butée à l'autre.

(Un pareil cercle gradué, avec les mêmes accessoires, est relatif à B, mais n'est pas représenté sur la figure.)

**La réaction électrique est due à une perturbation moléculaire.** — En effet, les réactions électriques varient avec les substances soumises à l'excitation. Par des excitants « superposés », les réactions de l'étain atteignent tout près d'un demi-volt, tandis que celles de l'argent sont de 0,01 volt. La valeur des réactions est d'ailleurs indépendante des affinités chimiques de la substance excitée, car les réactions de l'étain, qui, à ce point de vue, est relativement inerte, sont supérieures à celles du zinc. D'autre part, le signe des réactions est influencé par l'état moléculaire du fragment de métal mis en expérience (*voir* Chap. XII).

En ce qui concerne l'électrolyte, une solution étendue de Na Cl, de bichromate de potassium, est pratiquement équivalente à de l'eau ordinaire. Je me sers, en général, de l'eau de la canalisation de la ville. Un fil de Zn, dans une solution de $SO^4$ Zn, a des réactions d'un caractère tout semblable à celles du Pt ou du Sn dans l'eau pure, etc.

BIBLIOTECA DE BIOLOGIE



**Test-expérience.** — On pourrait objecter que l'effet électrique observé est dû, en quelque manière, soit au frottement engendré entre liquide et métal, lors de la torsion de ce dernier, soit à une action de surface, inconnue, développée au point de rencontre du fil, du liquide et de l'air.

A vrai dire, il a déjà été répondu à cette seconde objection par la modification [*fig.* 55, (*b*)], où le fil était complètement immergé, où toute variation de surface était supprimée, et où les réactions avaient lieu comme à l'ordinaire.

Mais les deux questions peuvent être, à la fois, l'objet d'un test définitif. Le fil qui subit, par torsion, une perturbation moléculaire énergique a son extrémité inférieure fixée. Si on le libère de son serrage, et qu'on lui imprime une vibration de torsion, peut-être subira-t-il encore une petite perturbation, mais, en tous les cas, les frottements, au sein du liquide, et au point où il en émerge, seront les mêmes qu'auparavant. Et si le fil, après l'impulsion reçue, gardait une perturbation résiduelle, celle-ci ne saurait être que tout à fait minime. En répétant l'expérience avec le fil successivement bloqué, puis libre, on pourra donc déceler les effets dus aux frottements.

Cela fut fait, en interposant une résistance extérieure de $10^6$ ohms. Le fil étant bloqué, et A recevant une série de vibrations de torsion de 180°, le spot était dévié de 210 divisions. En excitant B, on provoquait la déviation correspondante, inverse. Revenant au fil A, on le libérait, et on lui imprimait les mêmes vibrations de torsion, mais aucune déviation mesurable ne se manifestait plus. Et en retournant exciter B, resté bloqué, on retrouvait l'énergique déviation déjà constatée.

Dans ces expériences, tous les éléments du circuit étant restés les mêmes, à l'exception du blocage ou de la libération du fil, les réactions électriques constatées ne peuvent être dues qu'à la perturbation moléculaire engendrée par l'excitation mécanique du fil.

Il y a un intérêt théorique à pouvoir construire ainsi une « cellule » voltaïque d'un nouveau modèle, dont les éléments constituants sont *du même métal*. La perturbation moléculaire engendrée en est la principale source d'énergie. On peut garder

cette « cellule » active pendant un certain temps, en y versant un peu de vaseline, pour empêcher l'évaporation du liquide.

Dans les Chapitres suivants, de nombreux exemples montreront que toute cause qui accroît la mobilité moléculaire accroît aussi l'amplitude des réactions, et que toute cause inverse la déprime.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

# CHAPITRE XII.

## RÉACTIONS INORGANIQUES. MOYENS POUR AVOIR DES RÉSULTATS COMPARABLES.

Préparation du fil de métal. — Réactions à des excitants successifs égaux, assez espacés dans le temps pour que chacun d'eux agisse comme s'il était seul.

Nous allons passer à l'examen détaillé des courbes de réaction des métaux.

Les variations électriques manifestées peuvent aller de 0,04 volt au centième de cette quantité, selon le métal employé. Mais comme il s'agit d'un phénomène d'ordre moléculaire, il dépendra aussi de l'état physique du fil.

**Préparation du fil.** — Pour que les résultats obtenus soient réellement comparables, il est nécessaire que l'on parte de conditions initiales normales. Par exemple, le seul fait de monter le fil dans la boîte-« cellule » à expériences, le déforme légèrement, et les réactions peuvent en témoigner quelque irrégularité.

On fera donc bien de prendre les précautions suivantes :

1° Le fil est généralement livré en bobines. Avant de le monter, on en déroulera et dressera une certaine longueur, en le tendant légèrement et le frottant à l'aide d'un chiffon. Une fois lavé à l'eau, il sera prêt à être monté.

2° La « cellule » est remplie d'eau ordinaire; et un simple temps de repos sera favorable à la sensibilité de l'appareil.

3° Ces précautions suffisent le plus souvent. Mais il arrive

BCU LAUSANNE - CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

que malgré elles le fil de métal se trouve en état physique anormal. Dans ce cas, il sera bon de le recuire. Si, en effet, la réaction est un phénomène d'ordre moléculaire, tout ce qui accroît la mobilité moléculaire doit accroître l'intensité des réactions, et le recuit devra, par conséquent, avoir ce résultat.

La figure 58 confirme l'exactitude de cette manière de voir.

Avant. ↑ Après.

Fig. 58. — *Influence du recuit : accroissement des réactions des deux fils* A *et* B (*Étain*).

Excitant : vibrations de torsion de 160°, appliquées à intervalles d'une minute.

La « cellule » a été montée, comme il est dit en 1° et en 2°, et les trois premiers couples de réactions sont ceux de A et de B, excités alternativement. Ensuite, on a remplacé l'eau froide par de l'eau chaude, on a laissé l'appareil reprendre la température ambiante, et six couples de nouvelles réactions ont été enregistrées : le fait que les *deux* fils témoignent d'une sensibilité accrue prouve que l'heureux effet du recuit n'est pas une circonstance accidentelle.

4° Concurremment avec le recuit, on peut donner une « mise en train » aux deux fils, par des courts circuits et des vibrations de torsion, appliqués pendant un certain temps.

5° De même, enfin, une légère tension, *in situ*, peut aussi être efficace. J'ai, à cet effet, un dispositif à vis.

Par l'une ou l'autre de ces mesures, ou toutes ensemble, et un peu d'habitude, il est toujours possible d'amener les fils de métal à être en conditions normales. Dès lors, les réactions provoquées sont entièrement comparables, et il n'y a aucune raison pour que l'on n'arrive pas ainsi à des résultats parfaits.

**Réactions à des excitants successifs égaux, assez espacés dans le temps pour que chacun agisse comme s'il était seul.** — La figure 59 montre une suite de courbes toutes

Fig. 59. — *Réactions électriques successives d'amplitude constante (Étain).*

pareilles, qui sont les réactions à des excitants successifs égaux (vibrations de torsion d'angle constant) suffisamment espacés. On notera la parfaite régularité des réactions.

Après un long repos, un fil de métal peut n'être plus en état normal, mais après une courte durée d'excitation, les réactions redeviennent très régulières. C'est le cas de la figure 59.

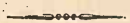
L'étain est à peu près infatigable, et il donne souvent des centaines de réactions successives, sans témoigner d'une fatigue appréciable.

Dans la figure 59, la partie ascendante des courbes de réaction est très redressée, et la partie du retour au zéro est convexe par rapport à l'axe des abscisses, car elle descend d'abord très rapidement, puis moins vite, dans sa dernière partie.

La variation électrique est une expression de la perturbation moléculaire, rupture temporaire de l'équilibre moléculaire. Lorsque cesse l'application de l'excitant, cesse également l'état d'excitation, et son expression électrique disparaît peu à peu avec le retour graduel des molécules à leur position initiale d'équilibre. C'est ce processus que traduit clairement la courbe du retour au zéro.

La durée du retour au zéro varie avec les métaux en cause, et, pour un même métal, varie avec tout facteur qui agit sur l'état moléculaire.

Lorsque l'excitant a cessé d'être appliqué, l'état d'excitation persiste donc encore un peu. On peut s'en rendre compte directement en laissant le galvanomètre en circuit ouvert pendant l'application de l'excitant, et en fermant le circuit à intervalles rapprochés, après l'application : on constatera, la persistance de la réaction électrique, diminuant d'ailleurs rapidement avec le temps. Le retour au zéro est rapide, mais des traces de distorsion persistent encore pendant quelque temps.



BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

# CHAPITRE XIII.

## RÉACTIONS INORGANIQUES.
## MOBILITÉ MOLÉCULAIRE : SON INFLUENCE SUR LES RÉACTIONS.

Inertie moléculaire; ses effets. — Remise en état; son retard, par un surmenage antécédent. — Modèle mécanique de la perturbation moléculaire. — Inertie moléculaire, combattue par des applications préalables d'excitants qui hâtent le retour au zéro, ou qui accroissent l'amplitude des réactions. — Influence de la température. — Actions chimiques : modification des temps des réactions (durée de réaction latente et durée du retour au zéro). — Variations à deux alternances.

On a vu que l'action d'un excitant provoque, en toute matière, une variation électrique, et qu'ensuite la matière revient peu à peu à son état initial.

Nous allons examiner maintenant comment diverses influences modifient la forme des courbes de réaction.

Il est bon, pour une telle étude, d'avoir un galvanomètre très sensible, dont l'aiguille ait une déviation de très longue durée, ou dont la bobine soit suspendue, comme celui de d'Arsonval.

Toutefois, en raison de l'inertie de l'instrument, l'enregistrement des variations électromotrices pourrait subir des retards. Mais on peut faire la discrimination entre ceux-ci et les effets dus à l'inertie moléculaire du métal étudié, en comparant deux diagrammes pris avec le même appareil, l'un avec la présence de ces derniers effets, et l'autre lorsqu'ils sont nuls ou à peu près.

Supposons, par exemple, que nous désirions savoir si la

BCU/UNIVERSITY LIBRARY

réaction électrique à un excitant mécanique est immédiate, et si elle disparaît aussitôt née.

En son principe, l'expérience consiste à comparer les deux déviations suivantes : dans le circuit où est la « cellule » on envoie d'abord un courant aussitôt interrompu que fermé [(*fig.* 60 (*a*)] et l'on enregistre la déviation du galvanomètre;

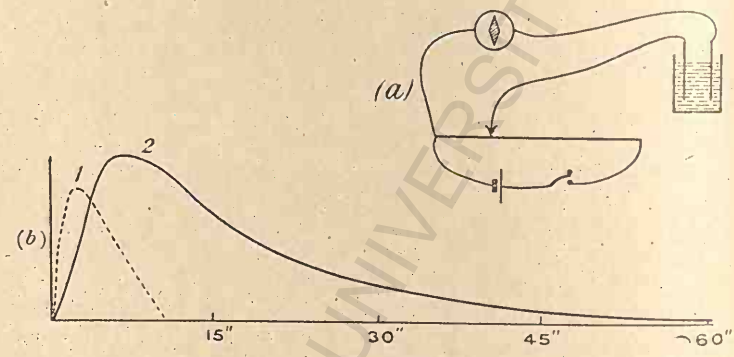



Fig. 60.

(*a*) Dispositif pour envoyer un courant très bref (potentiomètre).
(*b*) Deux retours au zéro, de durée différente : 1° après l'envoi d'un courant très bref; 2° après application d'un excitant mécanique.

puis on applique, à l'un des fils de la cellule, une vibration de torsion, et l'on enregistre la nouvelle déviation, due à cet excitant. Pour que les deux déviations aient lieu dans des conditions comparables, on règle, d'avance, par un potentiomètre, le courant très bref, de manière que la déviation qu'il engendre soit aussi proche que possible de celle que provoque la vibration de torsion; celle-ci, dans notre expérience, était accomplie en un quart de seconde, et le contact avec le circuit du potentiomètre était établi (par une clef de Morse) pendant un temps égal.

Cela posé, nous avions un tambour enregistreur qui donnait au papier un déplacement de 15$^{cm}$ par minute (le déplacement d'une de ses petites divisions représentait une seconde). Le

contact avec le circuit du potentiomètre était donc établi pendant un quart de seconde, et l'on enregistrait la déviation due à ce courant très bref. Ensuite on enregistrait la déviation due à la vibration de torsion appliquée au fil de la « cellule ». En comparant les deux diagrammes, on constatait que le maximum de la seconde courbe avait été atteint au bout d'un temps plus long que celui de la première, et que, tandis que, dans le premier cas, le galvanomètre était revenu au zéro en 11 secondes, le retour, dans le second cas, n'était pas encore complet au bout de 60 secondes [*fig.* 60 (*b*)].

Cette expérience montre qu'il faut un certain temps pour que l'effet d'un excitant mécanique atteigne son maximum, puis se dissipe.

Le temps nécessaire pour le retour au zéro dépend de l'intensité de l'excitant. Il croît avec cette intensité. En général, toutes choses restant les mêmes, les durées des retours au zéro pour des applications d'excitants d'égale intensité sont égales.

Voyons maintenant comment varient les courbes de réaction, lorsque varient les conditions de l'expérience.

**Retour au zéro retardé par un surmenage antécédent.** — Les deux courbes, données par la figure 61, montrent qu'un

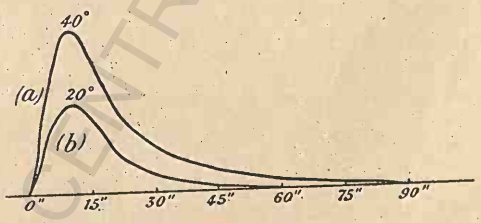



Fig. 61. — *Retour au zéro retardé par un surmenage antécédent.*

Après une vibration de torsion de 20°, le retour au zéro est complet au bout de 60 secondes. Mais avec un excitant d'intensité plus considérable (de 40°), la durée du retour au zéro est accrue de 30 secondes.

surmenage subi par la matière retarde sa remise en état.

La courbe (*a*) est la réaction à une vibration de torsion de 20°, et la courbe (*b*) correspond à une vibration de torsion de 40°. On voit combien, dans ce dernier cas, la durée du retour au zéro a été accrue.

**Modèle mécanique de la perturbation moléculaire.** — Nous avons vu que la réaction électrique était l'expression de la

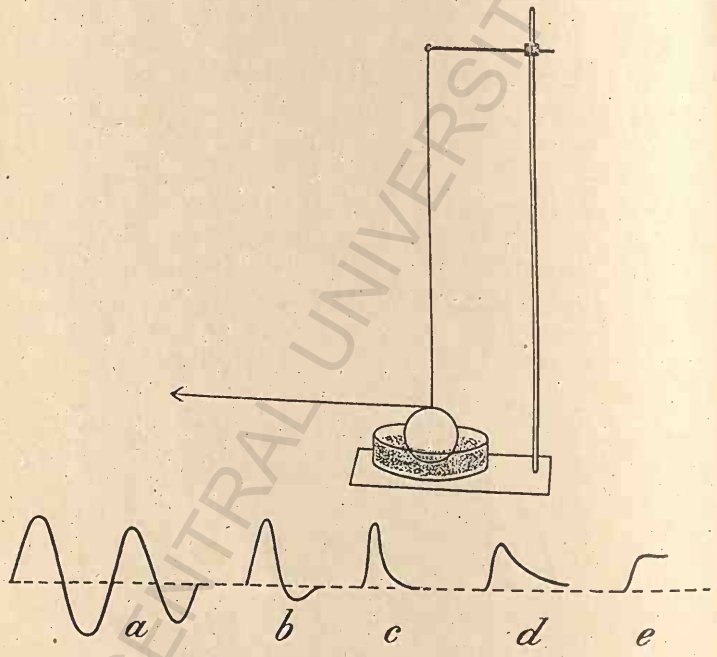



Fig. 62. — *Modèle mécanique donnant à l'aide du frottement l'image d'une perturbation moléculaire.*

perturbation moléculaire due à l'action de l'excitant. La partie ascendante de la courbe d'une réaction traduit la rupture de l'équilibre moléculaire, et la partie descendante exprime le retour à l'état d'équilibre.

Le modèle mécanique (*fig.* 62) aide à représenter maint phénomène de réaction. Il consiste en un pendule à torsion :

BCU LAU CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

un fil de métal supportant une sphère. Sous la sphère, on a disposé un récipient à demi rempli de sable, de manière à exercer sur elle un léger frottement. En soufflant sur la sphère (le souffle est ici l'excitant), on lui imprime une rotation (réaction), suivie d'un retour à la position initiale. La flèche de la figure schématise un levier, muni d'un style, pour pouvoir enregistrer les courbes de réaction. Pour un excitant constant, la forme des courbes de réaction dépendra de la mobilité de la sphère, et, par suite, du frottement imposé. Pour faire varier celui-ci, il n'y a qu'à élever ou abaisser le récipient contenant le sable.

Ce dispositif donne les courbes de réaction suivantes (*fig.* 62) :

(*a*). Avec un frottement minime, il y a des oscillations secondes. On trouve un phénomène correspondant à celui-ci dans les oscillations secondes de la rétine (voir *fig.* 105).

(*b*) et (*c*). Avec un frottement accru, il y a arrêt de l'oscillation. En (*c*) nous avons un type de courbes déjà rencontré parmi celles présentées par les nerfs, les muscles, les plantes et les métaux.

(*d*). Si la valeur du frottement croît encore, la courbe n'atteint son maximum qu'au bout d'un temps plus long. L'ordonnée de ce maximum est plus petite que les précédentes, et la durée du retour au zéro est allongée par arrêt mécanique partiel. La courbe (*d*) est toute semblable aux courbes traduisant un « arrêt moléculaire » comme celui dû à l'action de petites doses de substances chimiques, qui, à l'égard des tissus vivants ou des métaux, se comportent comme des toxiques [voir *fig.* 93 (*a*)].

(*e*). Si la gêne imposée au mouvement de la sphère augmente encore, il ne peut plus y avoir de retour au zéro [voir *fig.* 93 (*b*)].

Et au delà, le frottement empêche tout mouvement de la sphère, et il n'y a plus de réaction du tout.

De tout cela, il résulte, inversement, qu'avec la diminution du frottement, ou une mobilité moléculaire accrue, croît aussi l'amplitude des réactions. Les effets du recuit (*fig.* 58) ou ceux

d'une application préalable d'un excitant (*fig.* 81 et 82) illustrent ces propositions.

Et peut-être l'accroissement de l'amplitude des réactions sous l'influence de certains stimulants (*fig.* 89 et 90) est-il un phénomène connexe aux précédents.

**Inertie moléculaire, combattue par des applications préalables d'excitants qui hâtent le retour au zéro.** — Lorsqu'un fil de métal est resté trop longtemps au repos, surtout par les temps

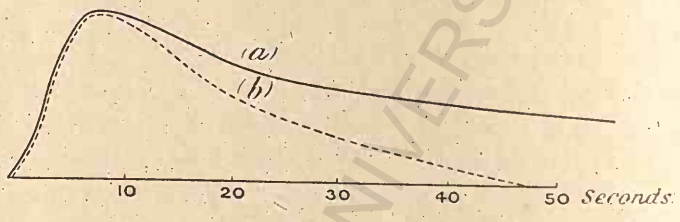



Fig. 63.

(*a*) Fil torpide. Retour ralenti et incomplet.
(*b*) Même fil. Retour hâté par quelques vibrations de torsion préalables.

froids, ses retours au zéro sont très ralentis : il semble devenu torpide ou inerte. Mais l'application d'une série d'excitants (vibrations de torsion) combattent cet état, et hâtent ses retours au zéro. Ce dernier phénomène est traduit par les deux courbes de la figure 63 : (*a*) témoigne d'un retour qui, au bout de 60 secondes, est encore incomplet, tandis qu'après quelques applications d'excitant, le retour au zéro, en (*b*), a pu s'effectuer au bout de 47 secondes. L'ordonnée du maximum, ici, n'a guère varié.

**Inertie moléculaire combattue par des applications préalables d'excitant, qui accroissent l'amplitude des réactions.** — Dans l'exemple précédent, le retour au zéro était plus prompt, sans que l'amplitude des réactions ait changé. Mais on peut aussi réveiller la mobilité moléculaire, et combattre l'état

ralenti, par des applications préalables d'excitant, qui provoquent un accroissement de l'amplitude des réactions. C'est ce dont témoignent les deux diagrammes suivants (*fig.* 64).

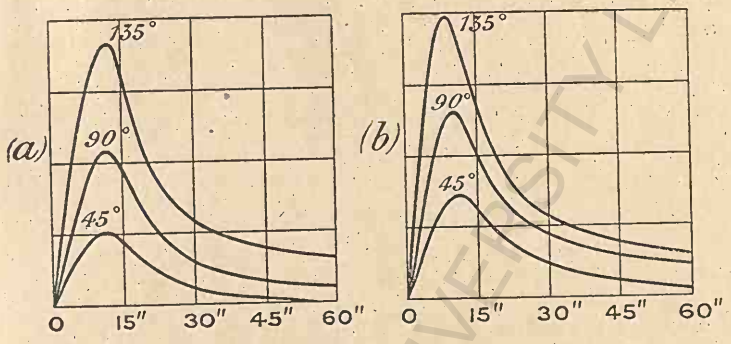



Fig. 64.

(*a*) Fil torpide. Trois réactions à des vibrations de torsion respectives de 45°, 90° et 135°.

(*b*) Même fil. Réactions aux trois mêmes vibrations de torsion, mais après des applications préalables d'excitant qui, en accroissant la mobilité moléculaire, ont également accru l'amplitude des réactions qui ont suivi.

Au moment de cette expérience, des gelées avaient rendu les fils torpides, comme tombés en léthargie. Les trois courbes (*a*) ont été enregistrées le premier jour. Elles correspondent à des vibrations de torsion respectives de 45°, 90° et 135°. En (*b*) sont trois autres courbes, dont tous les éléments sont supérieurs à ceux de (*a*). Les fils avaient, ici, subi des applications préalables d'excitant, qui avaient accru l'amplitude des réactions. Le retour au zéro n'en a pas été plus prompt, mais on se rappellera qu'une réaction accrue correspond à une distorsion moléculaire plus grande, et que, par conséquent, le retour au zéro tend à en être retardé.

Nous voyons donc que lorsqu'un fil de métal est en état ralenti ou torpide, des applications préalables d'excitant réveillent la mobilité moléculaire, et que ceci se traduit

par un retour au zéro avancé, ou par un accroissement de l'amplitude des réactions.

**Influence de la température.** — Des considérations du même ordre nous font penser qu'une élévation modérée de la tempé-

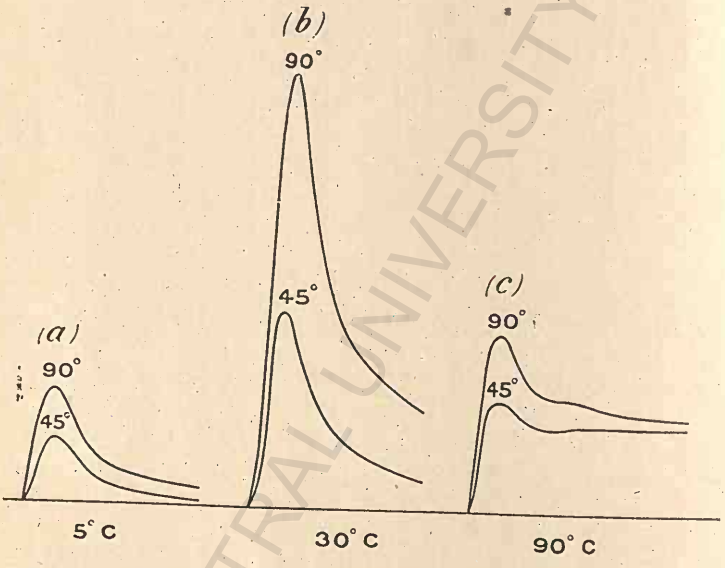



Fig. 65. — *Réactions d'un fil de métal à des vibrations de torsion de* 45° *et de* 90°.

(*a*) Réactions du fil, torpide, à 5° C.
(*b*) Réactions accrues à 30° C.
(*c*) Réactions diminuées à 90° C.

rature devra également accroître l'amplitude des réactions. C'est en effet ce dont témoigne la série des diagrammes suivants.

A 5° C., le fil était torpide, et ses réactions à des vibrations de torsion de 45° et de 90° étaient faibles [*fig.* 65 (*a*)].

En (*b*), on a remplacé, dans la « cellule », l'eau froide par de

BCU LAUSANNE CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

l'eau tiède, à 30° C. L'amplitude des réactions (aux mêmes excitants) en a été remarquablement accrue.

Mais la perturbation excessive, apportée par une température de 90°, a fait décroître, de nouveau, l'amplitude des réactions (*c*).

**Variations à deux alternances.** — Nous avons déjà rappelé que lorsque deux points A et B sont dans un état physico-chimique identique, un excitant d'intensité donnée, appliqué séparément à chacun d'eux, y provoquera des réactions égales et de signe contraire. Si l'excitant est appliqué simultanément aux deux points, les réactions se feront évidemment équilibre, *pendant toute leur durée*, et le galvanomètre restera immobile. Mais si l'intensité de l'excitant était supérieure en l'un des deux points, l'équilibre serait rompu, et l'on constaterait une déviation du galvanomètre, dont la grandeur et le signe pourraient être obtenus indépendamment, en faisant la somme algébrique des réactions, provoquées et recueillies séparément, de A et de B.

Nous avons vu aussi (1) qu'il y a, sur le fil de métal, un point, situé tout près de son milieu, tel que si l'on y place un « block », des excitants égaux (vibrations de torsion de même angle), appliqués séparément en A et en B, y provoqueront des réactions égales et de signe contraire. Appliqués simultanément, ils ne provoqueront aucune réaction. En enlevant le « block », et en excitant le fil entier, il n'y aura pas, non plus, réaction, et il en sera ainsi tant que les excitants donnés en A et B resteront égaux.

Cet équilibre étant donc établi, si nous appliquons, en l'un des points, une substance chimique stimulante, telle que $Na^2 CO^3$, et, en l'autre point, une substance déprimante, telle que KBr, les réactions des deux points, à un même excitant appliqué ensuite, deviendront inégales, et la déviation du galvanomètre sera plus grande au point devenu le plus sensible. Cependant, on peut rendre, aux deux points, les déviations du galvano-

(1) Se reporter au schéma figure 50 (*a*).

mètre égales, en augmentant l'intensité des excitants appliqués au point devenu le moins sensible. Et ainsi les déviations du galvanomètre, en A et en B, seront, de nouveau, égales et

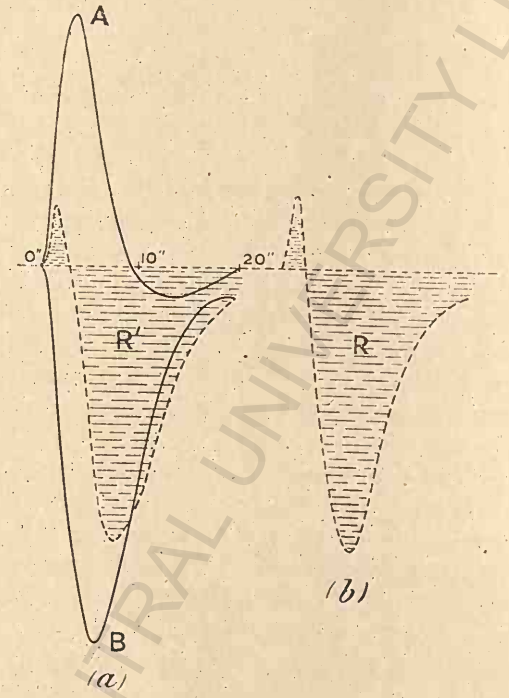



Fig. 66. — *Variation à deux alternances.*

(*a*) Diagrammes des réactions de A et de B, recueillis séparément. R' en est la somme algébrique.

(*b*) Diagramme à deux alternances obtenu en excitant simultanément A et B.

opposées. Mais, dans les conditions différentes où l'on a mis A et B, les temps, c'est-à-dire la durée de réaction latente, le temps mis par une réaction pour atteindre son maximum, et la durée du retour au zéro, ne seront plus les mêmes aux deux points : les réactions ne se feront plus équilibre

BCU / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

pendant leurs durées respectives, et nous verrons s'enregistrer une courbe à deux alternances, très intéressante.

La figure 66 donne la reproduction exacte des courbes de réaction de A et de B, enregistrées sur un tambour à rotation rapide.

On se rappelle que l'un des points avait été touché avec $Na^2CO^3$ et l'autre avec K Br. En faisant croître convenablement l'intensité des excitants appliqués à ce dernier point, on avait rendu à peu près égales les amplitudes des déviations du galvanomètre en l'un et en l'autre point. Les réactions de A et de B ont d'abord été enregistrées séparément [*fig.* 66 (*a*)]. On remarquera que le maximum de la réaction de A a été atteint plus tôt que celui de la réaction de B. La courbe R′ a été obtenue par sommation algébrique.

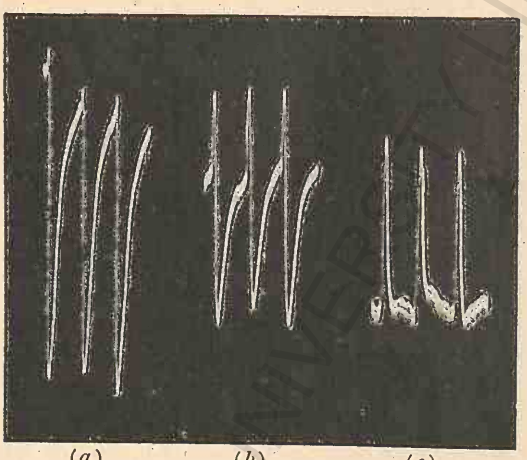
Puis, les deux points ont été excités simultanément, et l'on a enregistré la réaction résultante R. Celle-ci est à deux alternances, une alternance positive suivie d'une alternance négative, et elle est toute semblable à R′ [*fig.* 66 (*b*)].

La portion positive de la courbe traduit la réaction de A, et la portion négative traduit la réaction de B. Si, par un moyen quelconque (accroissement de l'intensité de l'excitant, ou exaltation de la sensibilité), on accroît beaucoup l'amplitude de la réaction de A, on peut faire prédominer la partie positive de la courbe, et diminuer d'autant la partie négative. Lorsque les deux parties de la courbe sont égales en grandeur absolue, il y aura encore une partie positive et une négative, et la partie enregistrée la première sera naturellement celle de la réaction qui s'est déclenchée le plus vite. Enfin, si la réaction de A est très réduite, la partie positive correspondante peut n'être plus qu'un minime sursaut, et la réaction négative dominera entièrement.

La figure 67 réunit trois diagrammes montrant bien ces trois types de réactions. Les deux contacts avaient été rendus inégalement excitables par $Na^2CO^3$ et K Br, respectivement. Puis on les a excités ensemble, et les réactions ont été enregistrées :

(*a*). Les excitants appliqués à A étant restés constants,

on a beaucoup accru l'intensité des excitants appliqués à B. Les réactions positives ont été réduites à une simple indication préliminaire, et les réactions négatives dominent tout.



(*a*) (*b*) (*c*)

Fig. 67. — *Réactions successives négatives, à deux alternances, puis positives.*

(*b*). En réduisant l'intensité des excitants appliqués à B, apparaissent les réactions à deux alternances.

(*c*). En réduisant encore l'intensité des excitants appliqués à B, les réactions de ce point ne sont plus représentées que par une petite courbe descendante, et les parties positives dominent seules.

**Passage progressif des réactions négatives aux réactions positives.** — Nous venons de voir trois étapes d'une transformation, due à la variation progressive de l'intensité des excitants appliqués.

J'ai réussi à obtenir la transformation graduelle de réactions négatives en réactions positives, par une variation progressive de la sensibilité relative des contacts.

J'avais trouvé que des reliquats de l'effet dû à l'application

de $Na^2 CO^3$ subsistaient pendant un certain temps. Si l'on a touché un point avec ce carbonate, puis qu'on en fasse disparaître toute trace par un lavage, la vivacité donnée à la sensibilité du point touché ne se dissipe que graduellement. De même, si, avec la solution de $Na^2 CO^3$ nous touchons un nouveau

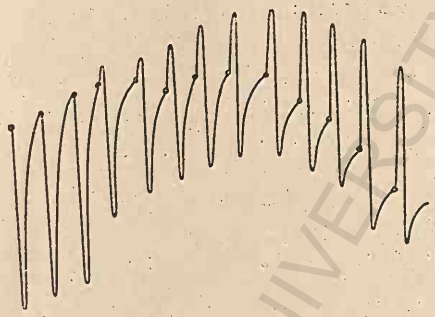


Fig. 68. — *Transformation graduelle de réactions négatives en réactions positives, en passant par des réactions intermédiaires, à deux alternances.*

Les gros points noirs marquent l'application successive des excitants.

point, la sensibilité s'exalte graduellement aussi. Et il y a encore cette circonstance intéressante que le début de la réaction est d'autant plus précoce que l'application de $Na^2 CO^3$ est plus récente.

Soient donc deux contacts A et B, sur un fil de métal, dont une extrémité est fixée, et dont l'autre, au moyen d'une poignée *ad hoc*, reçoit, à chaque minute, une vibration de torsion, d'intensité constante [*fig.* 50 (*a*), moins le mors médian].

En raison d'une application préalable de $Na^2 CO^3$ en B, la sensibilité de ce point est d'abord grande, et les trois premières réactions sont négatives (*fig.* 68).

Alors, une solution diluée de $Na^2 CO^3$ a été appliquée en A. La réaction de A se manifeste la première. Il y a d'abord un petit sursaut positif, suivi par la grande réaction négative de B.

Puis, cette petite réaction positive croît continûment, et la négative décroît. A la cinquième réaction, les deux alternances, positive et négative, sont devenues égales. Ensuite, c'est la positive qui domine, et la négative qui devient minime.

Il nous suffira d'ajouter que les réactions à deux alternances des métaux correspondent en tout point aux phénomènes pareils présentés par les tissus vivants.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

# CHAPITRE XIV.

## RÉACTIONS INORGANIQUES. FATIGUE. RÉACTIONS SUCCESSIVES D'AMPLITUDE CROISSANTE. RENVERSEMENT DES RÉACTIONS.

Fatigue des métaux. — Fatigue d'un métal tétanisé. — Réactions successives d'amplitude croissante. — Renversement des réactions des nerfs et des métaux, par modification moléculaire. — Nouveau renversement et retour au sens normal après tétanisation. — Accroissement de l'amplitude des réactions après tétanisation.

**Fatigue.** — Les réactions des muscles et des plantes présentent parfois un affaiblissement progressif traduisant la venue de la

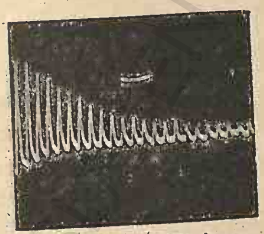


Fig. 69. — *Fatigue d'un muscle* (WALLER).

Fig. 70. — *Fatigue du platine.*

fatigue (*fig.* 69). Certains métaux présentent le même phénomène. Tel, le diagramme (*fig.* 70), obtenu avec du platine.

Nous avons dit que l'étain est pratiquement infatigable. Il ne faut cependant pas oublier que tout n'est qu'une question de degré, et que rien n'est rigoureusement infatigable. La venue de la fatigue dépend de différentes conditions, et j'ai obtenu un diagramme caractéristique de fatigue, avec un

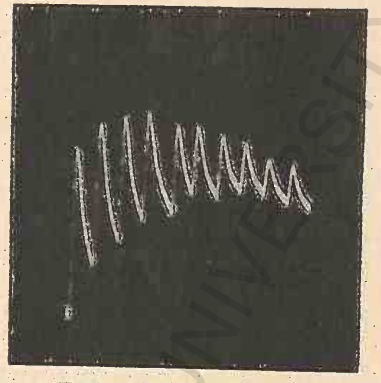


Fig. 71. — *Fatigue présentée par un fil d'étain qui avait subi des excitations incessantes depuis plusieurs jours.*

échantillon d'étain, qui était en expérience incessante depuis plusieurs jours (*fig.* 71).

A propos des plantes, j'avais été conduit à penser que l'un des principaux facteurs de la fatigue était la persistance d'une distorsion. Cette manière de voir se trouve corroborée par les réactions des métaux :

Tous les différents types de fatigue, propres aux tissus vivants, sont très exactement présentés aussi par les métaux. Or dans ce dernier cas, pour expliquer comment la fatigue survient et se dissipe, il n'est plus question d'invoquer d'abord une désassimilation ou désagrégation des tissus, et l'action de produits de déchet, puis une élimination de ces produits, et la réfection du tissu.

Nous avons constaté, à la fois pour les muscles et pour les plantes, que si entre chaque couple d'excitants successifs

on laisse au tissu le temps de se remettre complètement en état, l'amplitude des réactions successives reste la même, et que la fatigue n'apparaît pas (*voir* p. 41, *fig.* 20). Puis, qu'en abrégeant les intervalles de repos, l'amplitude des réactions décroît (*fig.* 20 et seq.). Nous avons la même chose avec les

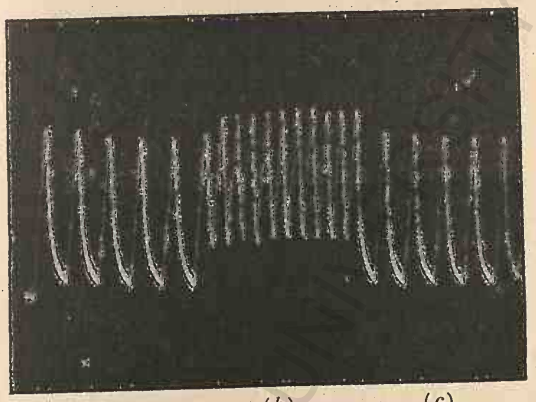



Fig. 72. — *Affaiblissement des réactions, dû à l'abréviation des repos.*

Excitants d'intensité constante.
(*a*) L'intervalle de temps entre deux excitants successifs est d'une minute.
(*b*) L'intervalle est d'une demi-minute.
(*c*) L'intervalle est de nouveau d'une minute.
Les réactions en (*b*) sont plus faibles qu'en (*a*) ou (*c*). (Comp. avec figure 20.)

métaux. La figure 72 reproduit un diagramme des réactions d'un fil d'étain. L'intensité des excitants (angle des vibrations de torsion) a été maintenue constante pendant toute la durée de l'expérience, mais en (*a*) l'intervalle entre deux excitants consécutifs était de 1 minute, tandis qu'en (*b*) il était réduit à 30 secondes. Aussitôt, l'amplitude des réactions avait décru. En revenant au rythme premier, en (*c*), l'ampli-

tude des réactions reprend une valeur élevée (comp. avec figure 20).

On voit ainsi que lorsqu'un fil de métal n'a pas pu revenir à son état initial, et qu'une certaine distorsion persiste encore, l'amplitude de ses réactions décroît. On comprend aisément que, dans ces conditions, la répétition de l'application de l'excitant puisse augmenter progressivement la distorsion, et que les réactions s'affaiblissent progressivement, c'est-à-dire manifestent de la fatigue. Alors plus un métal recevra longtemps des excitations, plus ses distorsions augmenteront, plus longs seront les repos dont il aura besoin pour se remettre chaque fois en état. Et si les repos sont maintenus simplement constants, les remises en état seront de plus en plus incomplètes et insuffisantes.

Ces considérations peuvent apporter quelque éclaircissement aux phénomènes de fatigue présentés par les matières vivantes.

**Tétanos et fatigue.** — L'apparition de la fatigue est particulièrement nette dans les diagrammes de réaction d'un tissu

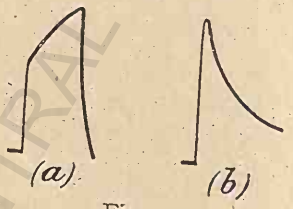



Fig. 73.

(*a*) Le haut de la courbe des réactions de l'étain, maintenu constamment excité, est horizontal ou ascendant.
(*b*) Celle du platine décline très vite, à cause de sa fatigue.

constamment excité, au point d'être en tétanos physiologique. Quand un muscle, par exemple, est frais et non fatigué, la partie supérieure de la courbe de son tétanos est horizontale, ou même ascendante. Mais, au bout d'un temps suffisamment long, on la voit décliner. La rapidité de ce déclin est fonction de la nature du muscle et de son état préalable.

Les métaux m'ont donné des phénomènes tout à fait parallèles. Le haut de la courbe du tétanos de l'étain, qui est si peu accessible à la fatigue, est horizontal ou ascendant. Si un déclin se manifeste, il est minime. La courbe du platine, au contraire, qui se fatigue aisément, montre un déclin précoce et rapide (*fig.* 73).

Prenons maintenant l'une quelconque de ces expériences, même celle où la fatigue est la plus marquée : en donnant un bref repos à l'échantillon traité, nous verrons revenir les réactions, avec leur amplitude d'avant. Ceci montre, une fois de plus, que la fatigue est due au surmenage, et que la distorsion résultante, ainsi que la fatigue qui en est le signe, se dissipe avec le temps.

**Réactions successives d'amplitude croissante.** — Le phénomène inverse de la fatigue est celui où des excitants successifs constants provoquent des réactions dont l'amplitude

(*a*) (*b*)

Fig. 74. — *Réactions successives d'amplitude croissante.*
(*a*) Réactions d'un muscle (Engelmann); (*b*) d'un métal.

croît progressivement. Ce phénomène est présenté, dans des conditions particulières, par certains muscles [*fig.* 74 (*a*)]. On l'a observé parfois aussi dans les réactions des nerfs, qui, d'ailleurs, sont très généralement, uniformes. Aucune explication satisfaisante n'en a été, jusqu'à présent, proposée. Les faits constatés sont en opposition avec la théorie qui veut que chaque état d'excitation d'un tissu soit suivi d'une désassimilation ou désagrégation et d'un affaiblissement de son

activité fonctionnelle, puisque ici la désassimilation hypothétique est suivie d'une augmentation de l'activité fonctionnelle.

J'ai montré que ces réactions d'amplitude croissante sont occasionnellement présentées par les plantes.

Les métaux aussi m'en ont donné. Dans le Chapitre précédent, nous avons vu des métaux, après un trop long repos, devenir comme torpides, et cette inertie moléculaire se dissiper graduellement par des applications convenables d'excitant. La conséquence en était une réaction d'amplitude accrue.

La figure 74 (*b*) reproduit les réactions successives à des excitants constants appliqués à du platine, qui était resté au repos pendant un certain temps. Ce diagramme est tout à fait net.

Ainsi, lorsqu'une matière est prise en état torpide, un certain régime d'excitation accroît sa mobilité moléculaire. L'amplitude des réactions provoquées croît donc, puis tend vers un maximum. Mais si l'application des excitants continue encore, du surmenage peut poindre, et les réactions commencent à décliner. On peut rapprocher ce comportement de celui de certains muscles, qui témoignent d'abord de réactions d'amplitude croissante, mais suivies ensuite de fatigue et de déclin.

**Renversement des réactions des nerfs et des métaux par modification moléculaire. Nouveau renversement et retour au sens normal, après tétanisation :**

1° *Nerfs.* — Nous avons déjà rappelé ce fait qu'un nerf qui, à l'état frais, a des réactions normales négatives, subit souvent, au contact de certains agents chimiques, une modification moléculaire, après quoi ses réactions deviennent positives. Ainsi, tandis que les réactions *normales* d'un nerf sont négatives, celles d'un nerf fatigué sont *modifiées*, c'est-à-dire positives, ou « renversées ». Cette « modification » particulière n'a pas toujours lieu, mais elle est trop fréquente pour pouvoir être considérée comme anormale. Et quand des applications répétées d'excitant ont mis le nerf en tétanos physiologique, ses réactions « modifiées » tendent à changer de signe de nouveau.

Enfin, on trouve que ce n'est pas seulement la tétanisation, mais l'action de $CO^2$ qui est capable de faire redevenir normales les réactions « modifiées ». De là à voir, dans le renversement des réactions d'un nerf, lors d'une tétanisation, l'influence hypothétique d'une « évolution » de $CO^2$, il n'y avait qu'un pas, et il a été franchi (1).

2° *Métaux.* — Il se trouve que j'ai retrouvé les phénomènes exactement parallèles, avec les métaux : renversement des réactions normales, par modification moléculaire; puis, sous

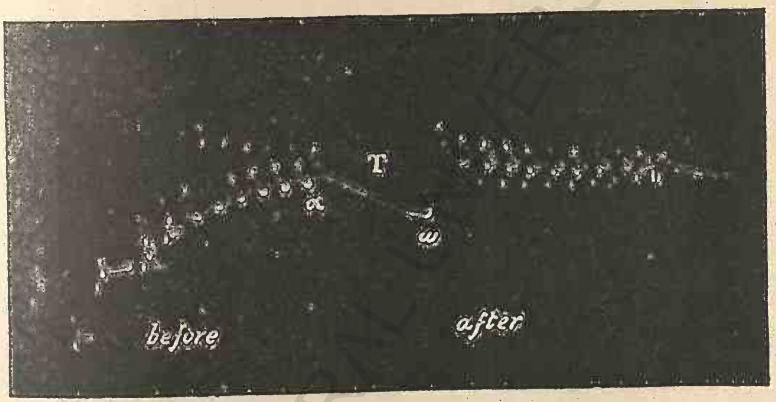



Fig. 75. — *Nerf. Réactions anormales positives (ascendantes), converties en réactions normales négatives (descendantes), après une série d'excitants tétanisants, en* T (WALLER).

(Le galvanomètre n'était pas « amorti » et avait une oscillation seconde.)

l'influence de la tétanisation, tendance à revenir aux réactions

(1) « Comme nous n'avons aucune preuve d'une modification chimique ou physique dans un nerf tétanisé, je considère qu'il est inutile de nous arrêter à la critique que ce n'est pas à $CO^2$, mais à « autre chose » qu'est dû ce résultat » (WALLER, *Électricité animale*, p. 59). Cependant, ce phénomène est justiciable d'une explication physique, ainsi que je vais le montrer.

normales. Et là, il n'est aucune possibilité à une « évolution » de $CO^2$.

Si après avoir monté un fil dans une « cellule » à réaction, remplie d'eau, je le laissais trop longtemps de côté, il subissait certaines modifications, et ses réactions, cessant d'être normales, changeaient de signe. J'ai vu ce phénomène se produire avec

Avant. T Après.

Fig. 76.

Avant. T Après.

Fig. 77.

*Réactions anormales (sommets en bas) de l'étain (fig. 76) et du platine (fig. 77), transformées en réactions normales (sommets en haut), après une série d'excitants tétanisants* T.

divers métaux, et même avec le platine, qui est chimiquement inerte.

La chose paraîtra peut-être plus claire, si nous entrons d'abord dans le détail du phénomène présenté par un nerf modifié, donnant des réactions anormales. Les réactions normales d'un nerf se traduisent d'ordinaire par des courbes qui *commencent* par descendre (sommets en bas), tandis que pour les réactions anormales, les courbes sont *d'abord* ascen-

dantes (sommets en haut). La disposition inversée, des courbes, caractérise donc l'état du nerf « modifié ». On la voit figure 75. Dans ce diagramme, on notera la diminution progressive de l'amplitude des réactions, indiquant la tendance au renversement. Puis, après les applications d'excitant avec tétanisation (T), le renversement a lieu.

Or, voici, d'autre part, deux diagrammes qui traduisent une transformation identique. Ici les réactions normales étaient positives (courbes à sommet en haut), et les réactions anormales négatives (courbes à sommet en bas). Le premier diagramme (*fig.* 76) a été donné par un fil d'étain, préalablement « modifié ». Il montre d'abord des réactions anormales, d'amplitude décroissante, ou tendant à s'inverser, puis, après tétanisation (T), des réactions inversées redevenues normales. Un second diagramme, donné par du platine, illustre le même phénomène (*fig.* 77).

En plaçant côte à côte les trois diagrammes, nerf, étain et platine, on voit qu'ils sont semblables en tout point [1].

On a donc vu, avec du métal, le retour à la réactivité normale se produire d'une manière très marquée après une tétanisation qui a dû ramener à l'état normal l'état moléculaire « modifié ».

Dans le désir de suivre toutes les étapes de cette transformation, j'ai pris une « cellule » à fil de platine qui donnait des

---

[1] Pour expliquer le phénomène de la réaction électrique, certains physiologistes supposent que les réactions négatives expriment un processus de désassimilation ou de désagrégation, et que les réactions positives traduisent un processus d'assimilation ou de réfection. Alors, dans le nerf, les réactions « modifiées », ou positives, sont considérées comme dues à une assimilation. Et après une tétanisation, ce processus est considéré comme devenu une désassimilation, avec des réactions négatives.

On voit combien il est clair que toutes ces suppositions sont arbitraires et inutiles, puisque toutes les réactions anormales et normales, et leurs transformations mutuelles réciproques, se retrouvent dans les métaux, où il ne peut, évidemment, être aucunement question d'assimilation ou de désassimilation.

réactions inversées, et j'ai enregistré les réactions obtenues

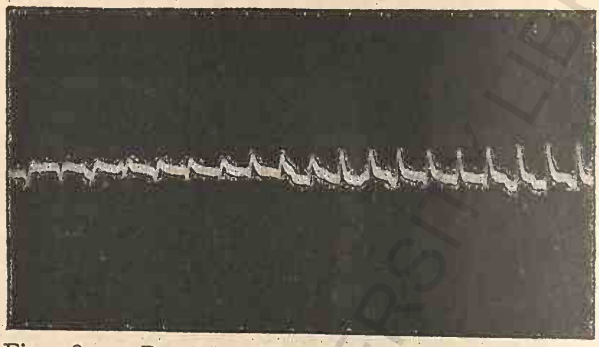


Fig. 78. — *Passage progressif de réactions anormales à des réactions normales* (*Platine*).

Le « passage » a commencé à la troisième réaction, et a été terminé à la septième (lire de gauche à droite).

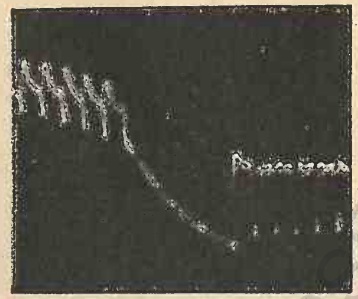
en donnant au fil une longue série d'excitations. On distingue, en effet, nettement, la région où le « passage » a eu lieu (*fig.* 78).

**Accroissement de l'amplitude des réactions, après tétanisation.** — Nous avons vu que par l'application d'une suite d'excitants constants l'amplitude des réactions successives croît, probablement par augmentation de la mobilité moléculaire.

On peut rapprocher de ce fait l'accroissement d'amplitude des réactions des nerfs, succédant à une tétanisation. Le fait a été observé par Waller (*fig.* 79).

Aucun des deux phénomènes n'est compatible avec la théorie, communément admise, de la désassimilation fonctionnelle, et de l'affaiblissement des réactions qui en est la conséquence.

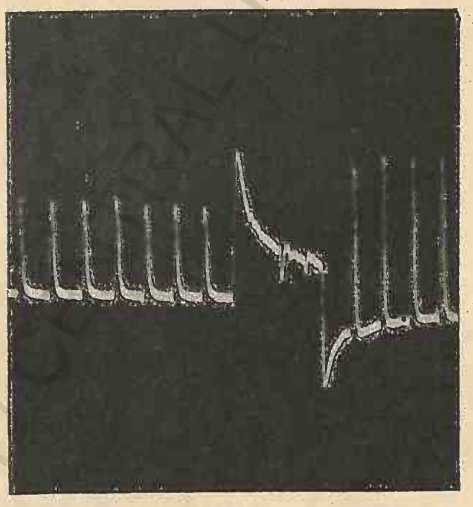
Waller suggère bien que l'accroissement des réactions, après tétanisation, est peut-être dû à l'évolution hypothétique du $CO^2$, à quoi nous avons déjà fait allusion. Mais on trouve qu'il y a une correspondance étroite entre ces phénomènes et ceux présentés par les métaux, dans les mêmes conditions. Voici deux diagrammes (*fig.* 80 et 81) obtenus, l'un avec du



*a* T *b*

Fig. 79. — *Les réactions normales d'un nerf, en* (*a*), *sont accrues en* (*b*), *après une série d'excitants tétanisants* T (WALLER).

Les réactions normales du nerf sont enregistrées avec les sommets en bas.



Avant. T Après.

Fig. 80. — *Réactions du platine, d'amplitude accrue après une série d'excitants tétanisants* T.



BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

platine, et l'autre avec de l'étain, et qui montrent comment les réactions subissent un accroissement, après l'application, au métal, d'une série d'excitants tétanisants. Le résultat est le même que pour un nerf.

Dans ces conditions, il semble bien que dans les deux cas l'explication valable soit, au contraire, celle déjà donnée

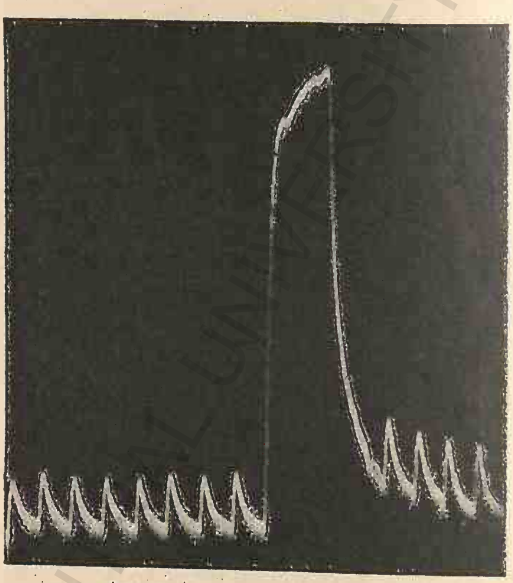



Fig. 81. — *Réactions de l'étain accrues après tétanisation* T.

plus haut : accroissement de la mobilité moléculaire, due à l'application répétée de l'excitant.

Il apparaît ainsi que, dans tous les phénomènes groupés sous les désignations de « réactions successives d'amplitude croissante », de « réactions accrues après tétanisation », de « fatigue », il y a une analogie étroite entre les comportements des muscles et des nerfs, d'une part, et, d'autre part, des métaux. Il n'est pas jusqu'aux anomalies rencontrées qui ne corroborent ces résultats.

Mais, entre tous ces phénomènes, au premier abord si divers, il existe une sorte de continuité. Pour nous en rendre compte, convenons de considérer *toutes* les réactions normales comme positives, et observons les variations qui surviennent, en même temps que varie l'état moléculaire de la matière soumise à l'expérience.

En commençant par le cas où la modification moléculaire est extrême, l'écart avec la normale présenté par les réactions est maximum, et elles sont *négatives*.

Cependant des excitants soutenus (tétanisation) provoquent le retour de la matière à l'état moléculaire normal, comme le montre l'affaiblissement progressif des réactions négatives, aboutissant, par renversement, aux réactions normales *positives*. Et ceci est également vrai du nerf et du métal.

Dans les phénomènes du groupe suivant, la modification subie par l'état moléculaire est moindre. Elle s'exprime par une inertie relative, et les réactions, bien que positives, sont faibles. Des excitations soutenues (tétanisation) accroissent l'amplitude des réactions dans le même sens, c'est-à-dire les rendent *positives plus encore*, ce qui est l'inverse de la fatigue. On voit ceci avec les réactions successives dont l'amplitude s'accroît, et dans les réactions accrues après tétanisation, montrées non seulement par les nerfs, mais aussi par le platine et l'étain.

Dans le groupe suivant, la matière est pleinement en état normal. Des excitants successifs constants provoquent des réactions successives égales et positives : il n'y a donc aucune fatigue. Mais après l'application d'excitants trop intenses, ou qui ont duré trop longtemps, la matière est surmenée. Les réactions subissent une altération, et deviennent *moins positives* : la fatigue survient.

Enfin, après l'application très prolongés d'excitants, les réactions peuvent tendre vers zéro, ou même subir un renversement, et devenir *négatives*, phénomène dont la rétine offre un exemple, lorsqu'elle a été longtemps exposée à la lumière.

Une matière peut donc se trouver en état moléculaire fort divers, soit par des modifications d'ordre interne, soit sous

l'influence d'actions venues du dehors. Les réactions expriment cet état. Un cycle complet de changements d'état moléculaire peut ainsi être établi, allant des réactions anormales négatives aux réactions normales positives, puis revenant de nouveau à des réactions négatives à la suite de renversements par excitations incessantes.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

# CHAPITRE XV.

## RÉACTIONS INORGANIQUES. RELATION ENTRE EXCITANT ET RÉACTION. EXCITANTS « SUPERPOSÉS ».

Relation entre excitant et réaction. — Analogies avec les aimants. — Réactions croissant avec l'accroissement d'intensité des excitants. — Seuil de la réaction. — Excitants « superposés ». — Hystérésis.

**Relation entre excitant et réaction.** — Nous avons vu, avec l'étain, que des excitants d'intensité constante provoquent des réactions extrêmement régulières. Il est évident que ce n'est point là un fait accidentel, mais le résultat d'une loi déterminée. Et ceci apparaît encore plus certain lorsque l'on constate que des intensités croissantes de l'excitant accroissent toujours aussi l'amplitude des réactions provoquées.

Une réaction électrique est due, nous l'avons vu, à une perturbation moléculaire, distorsion ou rupture d'équilibre, causée par l'excitant. Au moment d'étudier quelle relation existe entre l'action perturbatrice et la modification moléculaire produite, il est bon d'examiner certains phénomènes physiques analogues, où des forces de distorsion provoquent également des déformations du milieu.

**Analogies avec les aimants.** — Considérons l'effet produit par une force magnétique sur une barre de fer doux. On sait que chaque molécule de la barre est un aimant particulier. Et cependant la barre entière ne montre aucune aimantation. Pour l'expliquer, on admet soit que les aimants moléculaires

BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY

sont orientés d'une manière quelconque, soit qu'ils sont disposés en chaînes fermées, et qu'aucune polarité ne saurait en résulter. Mais lorsque la barre est soumise à un champ magnétique, par exemple à un courant solénoïdal, les molécules subissent un déplacement élastique, de manière que tous les aimants élémentaires s'orientent dans le sens des lignes de force magnétiques. Tous les pôles Nord sont ainsi plus ou moins orientés dans une certaine direction, et les pôles Sud dans

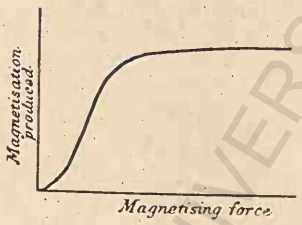



Fig. 82. — *Courbe d'aimantation.*

la direction opposée. Plus le champ magnétique est puissant, plus les molécules tendent à prendre une orientation parfaite, et plus grande est l'aimantation induite développée dans la barre.

L'intensité de cette aimantation induite peut être mesurée en notant la déviation qu'elle donne à l'aimant librement suspendu d'un magnétomètre.

Ainsi, la force qui provoque les déplacements moléculaires, dont résulte aussitôt l'aimantation de la barre, est le courant parcourant le solénoïde. L'aimantation est mesurée par la déviation du magnétomètre. Et la relation entre cette cause et cet effet peut être représentée par une courbe, en portant en abscisses les valeurs du courant, et en ordonnées celles de l'aimantation résultante (*fig.* 82).

En une telle courbe on peut, sommairement, distinguer trois parties. Dans la première, la force magnétique est petite, et la modification physique moléculaire minime. Dans la seconde, la courbe monte rapidement, c'est-à-dire qu'à une petite variation de la force magnétique correspond une modi-

fication moléculaire relativement considérable. Puis, la courbe tend vers une limite (troisième partie), où un accroissement notable de la force ne produit plus qu'un effet minime. La première partie de la courbe est convexe par rapport à l'axe des abscisses, la seconde offre une inflexion et la troisième est concave par rapport à l'axe.

**Réactions croissant avec l'accroissement d'intensité des excitants.** — En revenant, avec les métaux, à l'étude de la

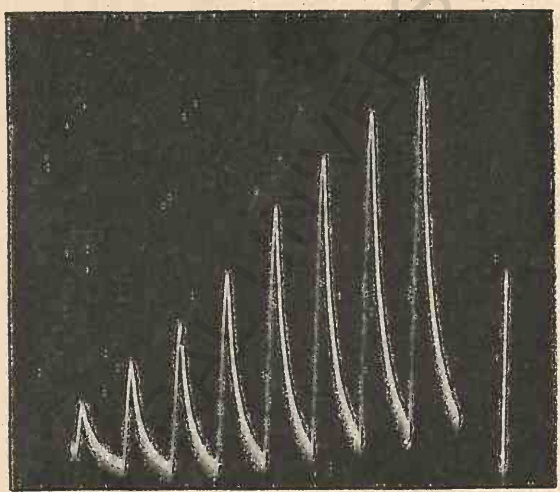



Fig. 83. — *Réactions de l'étain à des intensités croissantes de l'excitant (vibrations de torsion allant de 5° à 40°).*

La ligne verticale de droite représente 0,1 volt.

relation entre les valeurs de l'excitant et celles des réactions qui traduisent la modification moléculaire subie, nous trouvons quelque chose de très semblable.

En faisant croître les intensités de l'excitant, ce qui s'obtient en faisant croître l'amplitude des vibrations de torsion, on constate que l'amplitude des réactions croît d'abord d'une

manière minime, puis plus accentuée, et finit par tendre vers une limite.

Le parallélisme avec les réactions des tissus animaux ou végétaux est complet. Dans ces deux derniers cas, l'apparition de la fatigue vient compliquer le phénomène. Mais l'étain, qui est pratiquement infatigable, permet de poursuivre avec avantage la recherche actuelle. Je donne ici deux diagrammes obtenus avec de l'étain. Dans le premier (*fig.* 83), l'intensité de l'excitant va, de 5 en 5 degrés, de 5° à 40°. Il était appliqué à intervalles d'une minute. On notera que, pour les petites intensités de l'excitant, cet intervalle est suffisant pour permettre les retours complets au zéro. Mais, lorsque croissent les intensités de l'excitant, les temps des retours au zéro s'allongent et les retours ne sont plus complets. Aussi la ligne des zéros subit-elle une montée légère, ce qui, d'ailleurs, n'affecte pas le résultat, pourvu que le déplacement reste minime.

TABLEAU DE L'ACCROISSEMENT DES RÉACTIONS ÉLECTRIQUES, POUR L'ACCROISSEMENT D'AMPLITUDE DES VIBRATIONS DE TORSION.

| Amplitude des vibrations de torsion. | Variations électromotrices. |
|---|---|
| ° | volt |
| 5 | 0,024 |
| 10 | 0,057 |
| 20 | 0,111 |
| 25 | 0,143 |
| 30 | 0,170 |
| 35 | 0,187 |
| 40 | 0,204 |

Le second diagramme (*fig.* 84) correspond à un champ d'excitation plus étendu. Pour des mesures quantitatives, il vaut mieux s'assurer de retours complets au zéro. On peut l'obtenir, sans risquer de sortir des limites du cliché, en enregistrant les réactions pendant 1 minute, puis, pendant que le retour au zéro s'achève, en arrêtant le mouvement d'horlo-

gerie qui fait avancer la plaque, en même temps qu'on éteint le spot. Alors la réaction qui suit part bien d'une remise en état complète, indiquée par un point brillant, au début de chaque

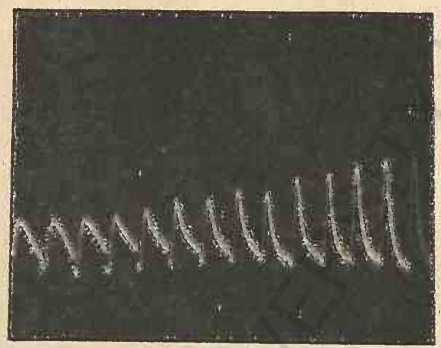


Fig. 84. — *Autre diagramme de réactions donné par un autre échantillon d'étain.*

Les amplitudes des vibrations de torsion sont de 10 en 10 degrés, de 20° à 160°. (Les déviations du spot ont été réduites en interposant dans le circuit une forte résistance.)

courbe. On voit que pour les grandes intensités de l'excitant, l'amplitude des réactions tend vers une limite.

**Seuil des réactions.** — Il est, pour l'excitant, une intensité

Fig. 85. — *Étain* (*excitants « superposés »*).

Un excitant isolé provoque une première réaction minime. La « superposition » de 5, 9, 13 excitants égaux donne des réactions successives d'amplitude croissante.

minima, en dessous de laquelle on ne peut guère apercevoir

de réaction. Cette valeur minima de l'excitant est dite le seuil de la réaction. Bien que les intensités de l'excitant inférieures au seuil de la réaction soient en apparence inefficaces, leur application produit cependant des effets latents, qui peuvent être révélés par leur addition. Le diagramme reproduit (*fig.* 85) montre comment des excitants individuellement inefficaces provoquent des réactions devenues effectives par la « superposition ».

**Excitants « superposés ».** — Des excitants successifs suffi-

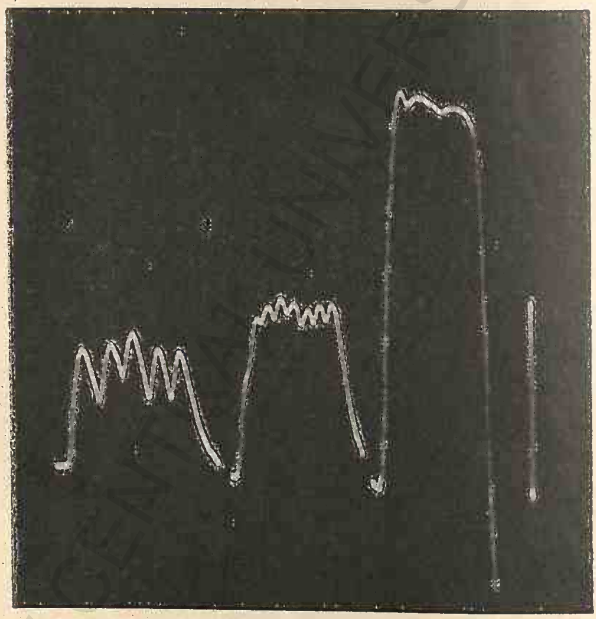


Fig. 86. —*Fusionnement incomplet et complet des réactions d'un fil d'étain.*

La fréquence des excitants croissant, le fusionnement des réactions devient de plus en plus complet.
La ligne verticale représente 0,1 volt.

samment rapprochés donnent, nous l'avons vu, des effets dits « d'addition ». Il y aura fusionnement des réactions, incom-

plet si les excitants sont trop peu rapprochés, mais tendant à devenir de plus en plus complet lorsque croît la fréquence des excitants (*fig.* 86). Nous avons ici un phénomène tout à fait parallèle à celui du tétanos physiologique, complet ou incomplet, du muscle.

La sommation de ces excitants de succession rapide engendre un effet d'amplitude maxima, auquel des excitants ultérieurs n'ajoutent rien (tout se passe comme si cet effet était équilibré par un effet antagoniste). La courbe de réaction atteint ainsi un maximum, puis la déviation du spot se fixe, immobilisée, tout le temps que dure l'excitation.

On a vu, un peu plus haut, que lorsque croissaient les intensités d'un excitant, croissait aussi l'amplitude de réactions successives correspondantes. Ceci est encore vrai des excitants qui s'additionnent. L'amplitude de l'effet résultant d'une sommation d'excitants croît avec l'intensité des excitants composants.

**Hystérésis.** — Il a déjà été fait allusion à l'accroissement d'amplitude que présentaient les réactions d'un métal qu'on avait soumis à des excitants préalables (*voir* p. 129).

Pour me rendre compte de ce phénomène, j'ai recueilli les observations d'expériences constituant un cycle complet, en notant une série d'effets maxima successifs, pour des vibrations de torsion, allant de 10 en 10 degrés, de 10° à 100°, puis, revenant, de même, de 100° à 10°. Les résultats laissent voir un hystérésis très net (*voir* A, *fig.* 87), car il y a un écart considérable entre les ordonnées respectives du départ de la courbe et de son point terminal : cette dernière ordonnée est plus grande. En renouvelant le parcours du cycle, l'écart diminuait, et le fil de métal témoignait d'une sensibilité plus constante. Lorsque ce régime est atteint, la sensibilité aux petits excitants est plus grande qu'au début de l'expérience, mais pour les grands excitants c'est l'inverse qui a lieu.

**Effet du recuit.** — J'ai répété les expériences, sans changer le fil de métal, après avoir rempli d'eau chaude la « cellule »

à réaction, et l'avoir laissée revenir à la température précédente. Le cycle B (*fig.* 87) montre que la sensibilité est alors beaucoup plus vive, et que l'écart entre les deux extrémités de la courbe a diminué. Dans le troisième cycle C, cet écart est même pra-

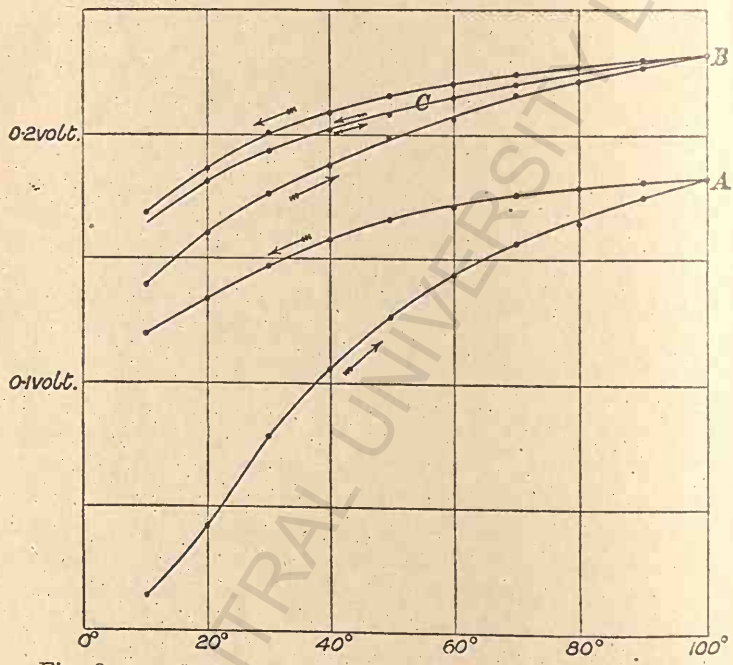



Fig. 87. — *Cycles des effets maxima, montrant les hystérésis.*

tiquement nul et les courbes d'aller et de retour coïncident. Ces résultats montrent comment l'excitabilité d'un fil de métal peut être accrue par des moyens purement physiques.

Il est fort curieux de constater qu'en ajoutant un peu d'une solution de $Na^2\,CO^3$ (*voir* Chap. XV, action des stimulants), on accroît l'amplitude des réactions et l'on réduit l'hystérésis, c'est-à-dire qu'on augmente la sensibilité, tout comme par un recuit.

BCU LAUSANNE CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

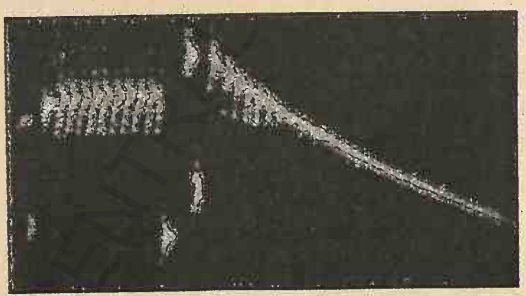
# CHAPITRE XVI.

## RÉACTIONS INORGANIQUES. EFFETS DES AGENTS CHIMIQUES.

Effets des agents chimiques sur les réactions des métaux. — Effet des agents stimulants. — Effet des agents déprimants. — Effet des toxiques. — Effets opposés des doses faibles ou élevées.

Nous avons vu que le dernier critère du caractère physiologique des réactions électriques est leur abolition par les agents chimiques qui se comportent comme des toxiques.

**Effets des agents chimiques.** — Parmi ces agents, il en est, comme les acides forts, les bases énergiques, et des sels, comme



Avant. ↑ Après.

Fig. 88. — *Réactions d'un nerf abolies par l'application d'un toxique* (WALLER).

le bichlorure de mercure, dont l'effet est général : ils sont des toxiques puissants, qui tuent les tissus vivants, et abolissent leurs réactions électriques (*fig.* 88).

Toutefois, il ne faut pas oublier que d'autres substances

ont des effets électifs, c'est-à-dire agissent sur certains tissus et non sur d'autres.

D'autre part, les toxiques peuvent être considérés comme provoquant, à un degré extrême, les effets des substances simplement déprimantes. Parmi celles-ci on peut citer le bromure de potassium, qui est un déprimant physiologique modéré, et qui réduit également les réactions électriques.

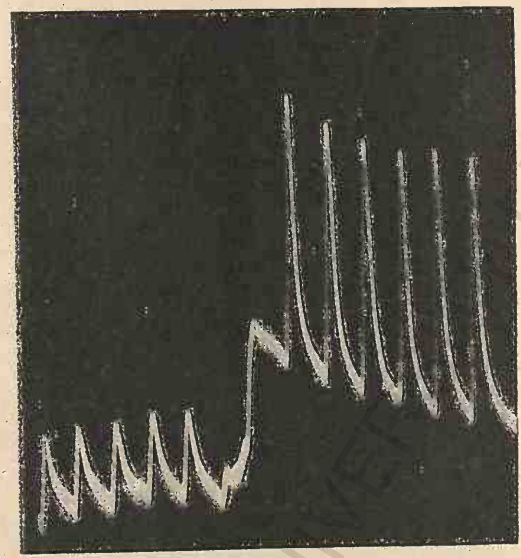
Enfin, il y a d'autres agents qui, au contraire, accroissent l'excitabilité, et exaltent les réactions électriques.

Nous allons donc rechercher si les réactions des substances inorganiques sont affectées par des agents chimiques, stimulées par les uns, déprimées ou abolies par d'autres. Si nous pouvons montrer qu'il en est ainsi, le dernier critérium désiré sera obtenu, et viendra compléter le parallélisme déjà mis en évidence entre deux grandes séries de phénomènes, d'une part les réactions électriques des tissus animaux, et d'autre part celles des plantes et des métaux.

**Effets des stimulants sur les réactions des métaux.** — Nous étudierons d'abord l'effet produit sur les réactions des métaux par divers stimulants.

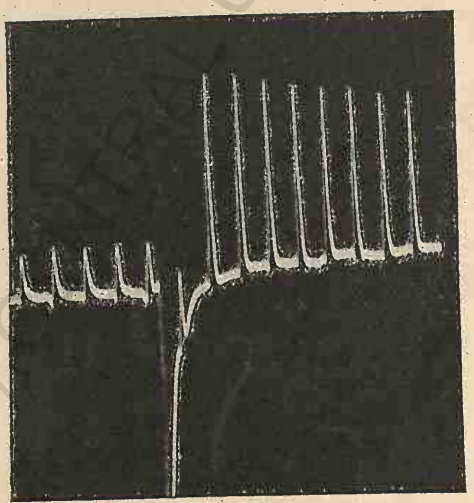
Le procédé généralement employé consiste à remplir d'eau ordinaire une « cellule » à réaction, et à enregistrer les réactions successives à une série d'excitants égaux. Puis, on ajoute à l'eau de la « cellule » une petite quantité de la substance dont on désire constater l'effet, et l'on enregistre une nouvelle série de réactions, dans les mêmes conditions que la précédente. En général, l'effet attendu se manifeste assez vite, mais il demande parfois un peu de temps pour se développer pleinement.

Il ne faut pas oublier que l'addition d'une substance chimique à l'eau de la « cellule » peut changer la résistance de cette dernière, et, par là, modifier les déviations du spot. On élimine cet effet parasite en interposant dans le circuit extérieur une résistance très élevée (de 1 à 5 mégohms), qui rend négligeable la résistance propre de la « cellule ». On peut vérifier alors que l'addition de l'agent chimique est sans influence sur



Avant. ↑ Après.

Fig. 89. — *Effet stimulant de* $Na^2CO^3$ *sur les réactions de l'étain.*



Avant. ↑ Après.

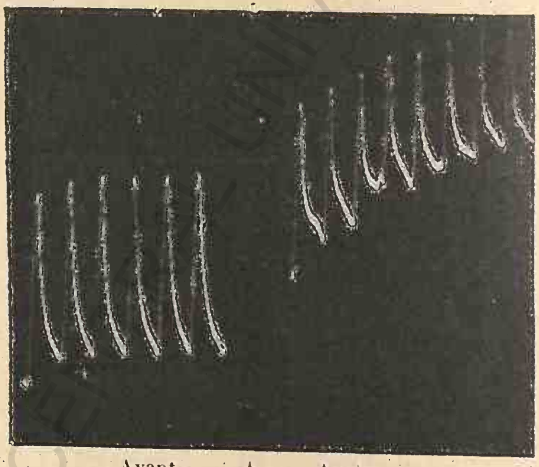
Fig. 90. — *Effet stimulant de* $Na^2CO^3$ *sur les réactions du platine.*

BCU IASI / UNIVERSITY LIBRARY

la résistance globale du circuit, en envoyant dans ce circuit, avant et après l'addition de l'agent à étudier, une force électromotrice d'une fraction connue de volt, et en constatant que les deux déviations du spot sont égales.

Je donne ici deux diagrammes, montrant l'effet stimulant du carbonate de sodium sur les réactions des métaux. Le résultat ressort avec évidence de la comparaison des réactions avant et après l'addition de $Na^2CO^3$. Les réactions de la figure 89 sont celles d'un fil d'étain, et un fil de platine a donné celles de la figure 90.

**Effets des substances déprimantes sur les réactions des métaux.** — Des effets opposés, c'est-à-dire l'affaiblissement des réactions, sont provoqués par d'autres agents chimiques. Le



Avant. ↑ Après.

Fig. 91. — *Effet déprimant de* K Br (10 pour 100) *sur les réactions de l'étain.*

diagramme ci-dessus (*fig.* 91) explicite la dépression produite sur de l'étain par une solution de K Br, à 10 pour 100.

**Effet des toxiques.** — Les toxiques tuent les tissus vivants,

et en même temps abolissent leurs réactions électriques. Il est curieux de constater que divers agents chimiques tuent, de même, les réactions des métaux. On voit, dans le diagramme (*fig.* 92), comment l'acide oxalique abolit les réactions. Son

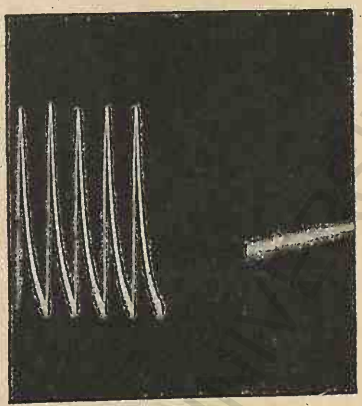



Fig. 92. — *Réactions abolies par l'acide oxalique.*

pouvoir toxique est si énergique que l'abolition est encore complète avec une solution à 1 pour 10 000.

Une autre circonstance à noter est la persistance de l'action toxique, bien mise en évidence par l'expérience suivante. Dans une « cellule » remplie avec de l'eau, les deux fils A et B donnaient des réactions égales. On les enleva, et B fut touché avec une solution d'acide oxalique dilué. Toute trace d'acide fut enlevée en frottant le fil, sous un courant d'eau, avec un chiffon. En replaçant les fils dans la « cellule », A manifesta de nouveau les réactions constatées auparavant, tandis que B n'en donna aucune. La dépression subie est si grande et si profonde qu'il m'est arrivé de ne pouvoir ramener de réaction, même après avoir enlevé au fil B une couche superficielle en le frottant au papier d'émeri.

Par le modèle mécanique qui servait à représenter les perturbations moléculaires [*fig.* 62 (*d*), (*e*)] nous avons vu qu'avec

un frottement suffisamment accru, la courbe de réaction mettait plus de temps à atteindre son maximum, que l'ordonnée de ce maximum était réduite, et que la durée du retour au zéro

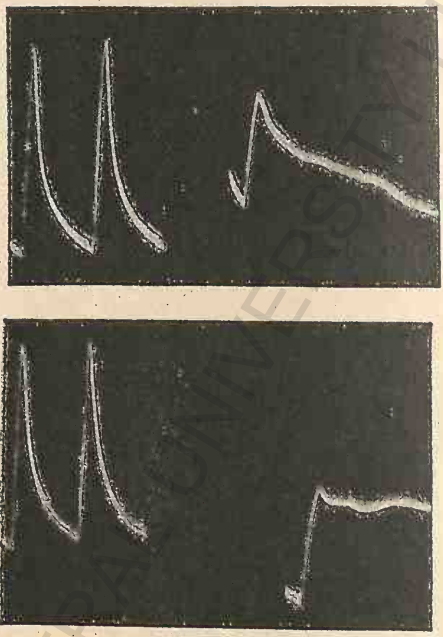



Fig. 93. — « *Arrêt moléculaire* » *par un toxique.*

Dans chacun de ces deux diagrammes, les deux courbes de gauche sont des réactions normales, et les courbes de droite traduisent l'effet du toxique.

En (*a*), l'arrêt se manifeste par l'allongement du retour au zéro; En (*b*), il n'y a plus de retour du tout.

était allongée par arrêt mécanique partiel, image d'une mobilité moléculaire diminuée.

Il semble bien que les corps qui se comportent comme des toxiques produisent aussi une sorte d'arrêt moléculaire. Les diagrammes suivants semblent appuyer cette manière de voir. Lorsque l'acide oxalique est en teneur assez notable, il n'y a aucune réaction. Mais en ajoutant, de ce corps, avec

précaution, une quantité juste convenable, le premier excitant appliqué au fil provoque une réaction électrique moindre que les réactions normales, et dont la durée du retour au zéro a passé de 1 à 5 minutes [*fig.* 93 (*a*)]. Dans l'autre diagramme [*fig.* 93, (*b*)], l'arrêt est plus prononcé, et il n'y a plus de retour au zéro. On remarquera aussi que le maximum est atteint beaucoup plus tard qu'avant. Et des excitants appliqués ensuite ne produisent plus aucun effet, comme si le mécanisme moléculaire était enrayé.

Il est intéressant de noter que l'effet de la vératrine sur le muscle est assez semblable à celui-là. Elle ne diminue pas seulement sa sensibilité, mais allonge considérablement la durée de sa remise en état.

Au sujet des effets chimiques, en général, les points suivants doivent être spécifiés :

1° Il n'y a pas seulement accroissement ou décroissance de l'amplitude des courbes de réaction, mais aussi modification des temps. Certains agents réduisent la durée de réaction latente, et d'autres allongent la durée du retour au zéro. De curieuses conséquences de ces modifications des temps ont été signalées à propos des variations à deux alternances (*voir* p. 113)

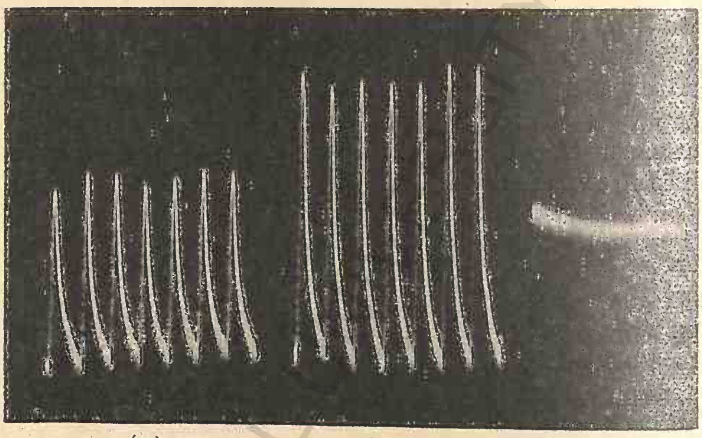
2° L'effet produit par un agent chimique dépend, jusqu'à un certain point, de l'état physique du fil de métal.

3° Un certain temps est nécessaire pour que l'effet acquière son plein développement. Avec certains agents, il est presque immédiat; avec d'autres, il est lent. Au bout d'un certain temps il peut atteindre un maximum, après quoi il fléchira légèrement.

4° Ces effets peuvent être temporaires ou persistants. On doit entendre par là que dans certains cas les réactions reviennent lorsqu'on enlève l'agent qui les avait abolies, et que dans d'autres cas l'abolition persiste, même après disparition de toute trace de l'agent.

**Effets opposés des doses élevées ou faibles.** — Il est enfin

un autre phénomène encore, bien connu non seulement des physiologistes, mais des médecins : un même agent, à doses élevées ou à doses faibles, produit des effets inverses. Or on retrouve ce phénomène, extrêmement net, dans les réactions inorganiques : la même substance, qui est stimulante à petite dose, devient toxique à haute dose. Dans la figure 94, en (*a*),



(*a*) (*b*) (*c*)

Fig. 94. — *Effets opposés des doses faibles ou élevées (Étain).*
(*a*) Réactions normales;
(*b*) Effet stimulant d'une faible dose de potasse (3 pour 1000);
(*c*) Réactions abolies par une dose élevée (3 pour 100).

on voit les réactions normales d'un fil de métal, la « cellule » étant remplie d'eau ordinaire. On ajoute de la potasse, de manière que le liquide devienne une solution à 3 pour 1000, et l'amplitude des réactions est aussitôt accrue (*b*). Mais on élève la teneur en potasse à 3 pour 100, et alors toute réaction est abolie (*c*).

Nous avons donc vu que pour les métaux, comme pour les tissus animaux et les tissus végétaux, les réactions sont stimulées, déprimées, ou abolies, par certains agents chimiques. Et le parallèle est complet, en tout point, entre les réactions organiques et inorganiques.

# CHAPITRE XVII.

## EXCITANT LUMINEUX ET COURANTS RÉTINIENS.

Impression visuelle : 1° Théorie chimique; 2° Théorie électrique. — Courants rétiniens. — Réactions normales positives. — Réactions inorganiques à un excitant lumineux. — Expérience décisive montrant la réaction électrique provoquée par un excitant lumineux.

L'action d'un excitant lumineux sur la rétine est perçue par le cerveau comme sensation visuelle. Mais le processus de cette action est loin d'être bien établi. Deux théories ont été proposées pour l'expliquer.

1° **Théorie chimique.** — Une première théorie, chimique, suppose que la rétine contient des substances sensibles à la lumière, et que la vision résulte des modifications qu'elles subissent. On suppose encore que ces modifications présentent deux phases, une phase descendante, destructive ou catabolique, et une phase ascendante, constructive ou anabolique. Les différentes substances rétiniennes donneraient ainsi, par leurs réactions, les sensations variées de lumière et de couleur.

Cette théorie, on le voit, est bien compliquée, et diverses objections s'y opposent. On comprend mal, par exemple, comment l'impression visuelle, si rapide, pourrait être due aux actions chimiques, relativement lentes, correspondant à la désagrégation d'un tissu, et à sa réfection. Cependant cette théorie semblait avoir rencontré un appui dans les changements de teinte du pourpre rétinien, sous l'action de la lumière. Mais on a trouvé ensuite que la présence ou l'absence du pourpre rétinien n'était nullement indispensable à la vision, et que par

conséquent, lorsque cette fonction existait, elle était d'un intérêt secondaire : on sait, en effet, que le pourpre manque dans la *fovea*, qui est l'endroit de la rétine où la sensibilité est optima; et qu'il manque également dans la rétine de beaucoup d'animaux, dont la vue est cependant excellente.

2° **Théorie électrique.** — Une seconde théorie, électrique, voit dans l'impression visuelle un phénomène concomitant d'une perturbation électrique : courant électrique engendré dans la rétine par la lumination, et transmis au cerveau par le nerf optique. Beaucoup de choses sont en faveur d'une telle conception, car il est certain que la lumination provoque des courants rétiniens, et, réciproquement, qu'un courant, convenablement appliqué, donne une sensation de lumière.

**Courants rétiniens.** — Holmgren, Dewar, Mc Kendrick, Kuhne, Steiner, et d'autres, ont montré que la lumination d'un œil fraîchement excisé engendrait des courants électriques. Mais si le fait est universellement admis, il y a des divergences au sujet du signe qu'il convient d'attribuer à cette réaction, au moment précis où l'excitant est appliqué, pendant son application, et à l'instant où il cesse. Ces différences peuvent provenir, d'une part, de dénominations insuffisantes (par exemple, l'usage des termes *positif* et *négatif*, jusqu'ici en vogue), et, d'autre part, de l'état des yeux excisés. Ainsi Waller, dans son travail, excellent et détaillé, sur les courants rétiniens de la grenouille, a montré que le signe des réactions subit un renversement lorsque l'œil va mourir.

Au sujet des confusions qui peuvent naître de la terminologie actuelle, il faut se rappeler que les termes de *positif* ou de *négatif* sont employés par certains, relativement à un courant de référence, le courant dit « de lésion ». Lorsque deux contacts galvanométriques sont établis, l'un à l'extrémité, sectionnée, du nerf optique, et l'autre sur la cornée, intacte, un courant de lésion se manifeste qui, *dans l'œil*, va du nerf à la rétine. Dans un œil normal, fraîchement excisé, le courant de réaction, provoqué par l'action de la lumière sur la rétine,

va, toujours, du nerf, qui n'est pas directement atteint par l'excitant, à la rétine, c'est-à-dire du point moins excité au point plus excité (*fig.* 95). Ce courant de réaction circule donc

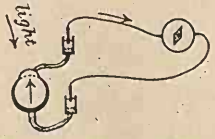



Fig. 95. — *Réaction de la rétine à la lumière.*
Le courant de réaction va du nerf à la rétine.

dans le même sens que le courant de référence (en l'espèce, le courant de lésion) et sera donc appelé *positif*. Seulement, le courant de lésion change de sens très facilement, et, en ce cas, va, dans l'œil, de la cornée au nerf. Et comme le courant de réaction n'a pas varié, son sens est maintenant opposé au sens du courant de référence, et, relativement à lui, *paraît* être *négatif*.

J'ai, pour ma part, déjà formulé le souhait que l'on nommât *positifs* les courants qui se dirigent *vers* le point *le plus excité*, et *négatifs* ceux qui s'en éloignent. Si ces dénominations étaient adoptées, toute confusion serait impossible, même lorsque, comme c'est le cas ici, les courants de lésion changent de sens.

**Réactions normales positives.** — Les réactions normales d'une rétine sont positives, si l'exposition à la lumière n'est pas trop prolongée. La cessation de la lumière est aussitôt suivie de la remise en état. Tout le monde est d'accord à ce sujet, et les dérogations sont considérées comme imputables à un état non normal de l'œil, dû, soit à un traitement trop rude, soit aux approches de la mort : de même qu'une plante, sur le point de mourir, présente parfois un renversement de ses réactions (de négatives, positives), de même une rétine présente, dans les mêmes conditions, des réactions inversées, c'est-à-dire négatives.

Au reste, le signe des réactions, ainsi que nous l'avons vu en de nombreux exemples, est directement lié à l'état physique, moléculaire, de la matière en cause, et il n'est pas étonnant qu'une modification de cet état entraîne, *ipso facto*, une modification des réactions.

Différant en cela du muscle, les réactions successives d'une rétine varient peu, et présentent une fatigue minime, parce que la rétine se remet parfaitement en état, même après une lumination forte, pourvu que celle-ci n'ait pas été de trop longue durée. Mais il peut se présenter des cas exceptionnels, avec une fatigue manifeste, ou avec l'inverse, c'est-à-dire des réactions successives d'amplitude croissante.

**Réactions inorganiques à un excitant lumineux.** — On se demande maintenant si un phénomène, aussi complexe que les réactions d'une rétine, a son correspondant dans les réactions de la matière non vivante.

Prenons une petite barre d'argent, « refoulons » l'une de ses extrémités, et donnons-lui ensuite la forme d'une petite coupe ou cupule, puis sensibilisons sa face concave en l'exposant, un court espace de temps, à des vapeurs de brome. Remplissons d'eau la cupule et relions-la à un galvanomètre, par deux électrodes impolarisables : un courant parcourt le circuit extérieur, dû à la différence d'état entre la face concave de la cupule et l'extrémité intacte de la barre. On peut, si c'est opportun, faire équilibre à ce courant par un montage en « opposition ».

Nous avons ainsi un dispositif ressemblant en quelque manière à un œil, avec une couche sensible correspondant à la rétine, et le tronçon de barre, moins sensible en dessous, correspondant au tronçon du nerf optique [*fig.* 96 (*a*)].

L'appareil est placé dans une chambre noire, ayant une ouverture à la face supérieure. A l'aide d'un miroir incliné, on envoie un rayon lumineux dans l'ouverture, jusqu'à la surface sensible.

Aussitôt, l'équilibre précédemment établi est rompu, et un courant de réaction, positif, se manifeste. Positif, c'est-à-dire

allant de l'extrémité, moins excitée, vers la couche sensible, plus excitée. En éteignant le rayon, survient le retour au zéro, assez rapide [*fig.* 96 (*b*)].

Le caractère et l'amplitude de la variation électrique de cette

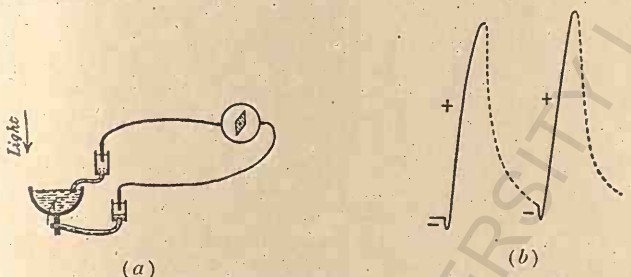



Fig. 96. — *Diagramme des réactions à la lumière d'une « cellule » sensible.*

Les traits pleins correspondent aux luminations, et les lignes pointillées aux retours au zéro, dans l'obscurité.

On notera la très minime réaction négative préalable : on en observe parfois de semblables avec les rétines de grenouille.

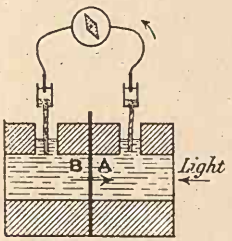
« cellule » sensible dépend, jusqu'à un certain point, de son mode de préparation. La « cellule » qui a servi à la plupart des expériences relatées ici donnait une variation électrique de 0,008 volt, lorsqu'on l'exposait, pendant une minute, à la lumière d'un bec de gaz incandescent, placé à une distance de 50$^{cm}$.

**Expérience décisive montrant la réaction électrique provoquée par un excitant lumineux.** — La production d'un courant électrique, sous l'influence d'un excitant lumineux, apparaît comme un phénomène très complexe. Pour nous mettre à même de le comprendre mieux, imaginons d'abord un cas très simple.

Dans nos expériences avec de l'étain, nous avons vu, dans une même tige, un excitant mécanique provoquer une différence de potentiel entre deux régions inégalement excitées; et, nous pouvions, à l'aide de connexions électrolytiques convenables, mettre en évidence un courant de réaction. Le point le plus excité se comportait comme zincoïde, ou comme cuproïde,

suivant la matière mise en expérience, et suivant son état physique moléculaire.

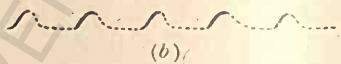
Qu'arriverait-il maintenant si la tige était laminée en une plaque plane, et que l'une de ses faces fût exposée à la lumière, l'autre en étant protégée ? Prenons deux blocs de paraffine, percés d'une large ouverture. Plaçons entre eux une plaque de métal, versons de la paraffine fondue pour sceller les joints, et fermons les deux extrémités du bloc, restées ouvertes, par




(*a*)

Fig. 97 (*a*).

A et B sont les deux faces, bromurées, d'une plaque d'argent. L'une des faces, soit A, est exposée à la lumière. Le courant de réaction, dans la plaque, va de B en A.



(*b*)

Fig. 97 (*b*). — *Diagramme des réactions données par la « cellule »* (*a*)

Excitant et temps : 10 secondes d'exposition à la lumière, suivie de 50 secondes de remise en état, dans l'obscurité. Les traits pleins représentent les réactions à la lumière, et les lignes pointillées les retours au zéro.

deux plaques de verre. Nous avons réalisé ainsi [*fig.* 97 (*a*)], deux compartiments, séparés par une plaque de métal, et nous pouvons y ménager, en haut, deux orifices pour y verser de l'eau.

L'eau qui a rempli les compartiments séparés est en contact parfait avec les faces A et B du métal, et, par deux électrodes impolarisables, permet de les relier à un galvanomètre, comme l'indique la figure. Si le métal a été parfaitement recuit, il n'y aura aucune différence de potentiel entre les deux faces, et aucun courant ne traversera le galvanomètre. Mais il n'en serait plus de même si, d'un côté ou de l'autre,

BCU IASI CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

l'état moléculaire était modifié, et dans ce cas on verrait apparaître un courant, qui serait la résultante algébrique des actions exercées. Et, en effet, en exposant à la lumière l'une seulement des faces de la plaque, on provoque aussitôt un courant de réaction, de sens d'ailleurs variable.

Le métal est très conducteur, et la plaque peut être prise très mince, de sorte que la résistance électrique y est négligeable. Il est donc remarquable qu'une différence de potentiel

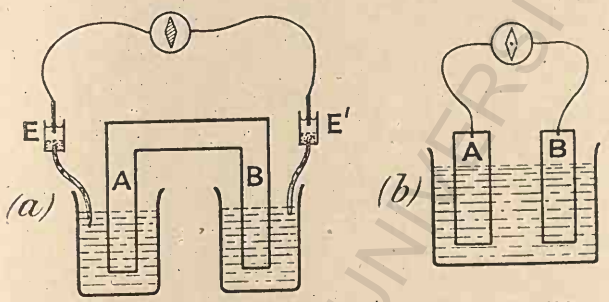



Fig. 98. — *Modifications de la « cellule » sensible.*

ait pu être établie entre les deux faces, et surtout puisse subsister en de telles conditions. L'action unilatérale de la lumière a donc rendu moléculairement hétérogène une plaque homogène. Elle a mis ses deux faces en état électrique différent, et elles se comportent maintenant comme si elles possédaient une couche superficielle différenciée, zincoïde dans l'une et cuproïde dans l'autre.

Cela fait, on peut passer à un arrangement voisin, où l'on retrouve des éléments déjà vus. Au lieu de deux faces d'une même plaque, dont l'une seulement est l'objet d'une lumination, on peut envisager une face unique, mais dont on n'éclaire qu'une partie. Par exemple, on peut avoir une plaque à deux branches, telles que A et B [*fig.* 98 (*a*)]. On fait plonger A et B dans deux récipients séparés, contenant de l'eau, et reliés respectivement à un galvanomètre, par deux électrodes impolarisables E, E'. En éclairant A, pendant qu'on abrite B, on

engendre aussitôt un courant électrique, dont le sens change si, au contraire, on éclaire B pendant qu'on abrite A.

Opérons maintenant comme nous l'avons fait pour les « cellules » à torsion [*fig.* 55, de (*b*) à (*c*)]. Sectionnons la plaque en son milieu, pour en obtenir deux, et transférons les contacts

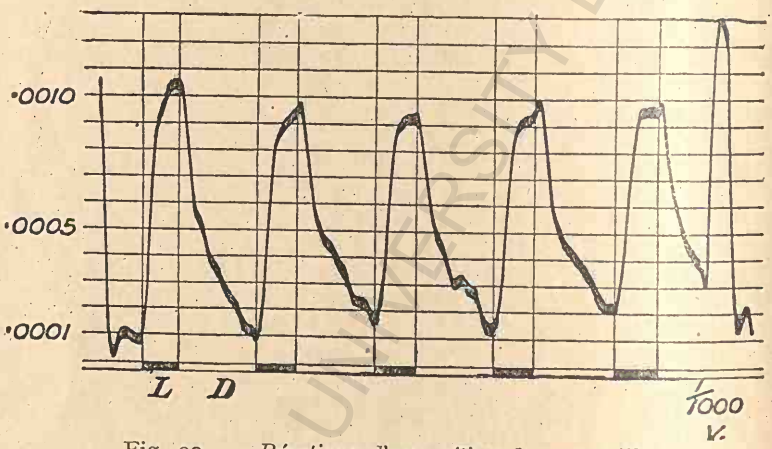



Fig. 99. — *Réactions d'une rétine de grenouille à un excitant lumineux.*

L, luminations d'une minute;
D, remise en état, dans l'obscurité, pendant 2 minutes.

galvanométriques du liquide au métal. Le nouveau dispositif prend l'aspect indiqué par le schéma (*b*) de la figure 98. Les faces postérieures de A et de B sont ensuite recouvertes d'un enduit isolant, et, finalement, l'on a constitué une « cellule » photo-électrique, type.

Or l'œil vivant, précisément, est comparable à une telle « cellule » photo-électrique. Pour le voir, il suffit de rapprocher les courbes de réaction d'une telle « cellule », des courbes de réaction d'une rétine, prises dans les mêmes conditions.

La figure 100 reproduit les réactions, très régulières, d'une « cellule » soumise à des luminations successives constantes. En mettant en regard le diagramme des réactions d'une rétine (*fig.* 99), on voit à quel point les deux phénomènes sont pareils.

La régularité, ou égalité des réactions d'une rétine, n'est qu'approchée, et il existe en outre des cas où se manifestent des réactions successives croissantes, ou, au contraire, des réactions décroissantes, par légère fatigue, comme Waller a pu le constater. Dans les réactions de notre « cellule » d'argent,

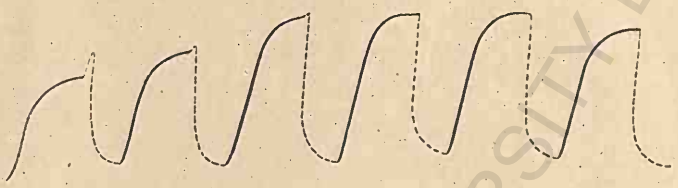


Fig. 100. — *Réactions d'une « cellule » sensible d'argent.* Luminations d'une minute, suivies d'obscurités d'une minute. Les traits pleins représentent les réactions pendant les luminations, et les lignes pointillées les retours au zéro.

on peut remarquer aussi, au début, des amplitudes croissantes, et, un peu plus tard, une légère fatigue. J'ai d'ailleurs recueilli aussi d'autres diagrammes où, malgré la durée de l'expérience, la constance des réactions ne trahit aucune fatigue.

Dans les réactions de la rétine, on peut encore remarquer une particularité curieuse : au moment où cesse la lumination, la réaction témoigne parfois d'un minime sursaut, suivi de retour au zéro : ceci se voit aux quatrième et cinquième courbes de la figure 99. Or cette même particularité est présentée par les deux premières courbes de la figure 100. Et, plus tard, nous verrons d'autres exemples de phénomènes du même genre.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

# CHAPITRE XVIII.

## RÉACTIONS INORGANIQUES. INFLUENCES EXERCÉES PAR DIVERS AGENTS SUR LES RÉACTIONS A UN EXCITANT LUMINEUX.

Influence de la température. — Influence du temps d'exposition. — Relation entre l'intensité lumineuse et l'amplitude des réactions. — Oscillation « seconde ». — Anomalies des réactions : 1° petite réaction préliminaire négative; 2° renversement des réactions; 3° réactions positives temporaires, à l'interruption de la lumière; 4° déclin et renversement. — Résumé.

Nous allons maintenant examiner ce qui se produit lorsqu'on soumet une « cellule » photo-sensible aux influences diverses qui font varier les réactions normales d'une rétine.

Puis, nous regarderons si, parmi les réactions d'une « cellule » de métal, on ne trouverait pas des anomalies, correspondant à celles présentées parfois par les rétines vivantes.

**Influence de la température.** — On a constaté que lorsque la température dépassait un certain degré, les réactions de la rétine manifestaient un déclin rapide. Puis, qu'en revenant à des températures plus fraîches, les réactions retrouvaient leur vigueur première. La même particularité se retrouve dans les réactions d'une « cellule » sensible, ainsi qu'en témoignent les diagrammes reproduits figure 101. En (*a*) est une première série de réactions, prises à 20° C. Après avoir manifesté une légère fatigue, elles sont devenues constantes. En élevant la température à 50°, elles sont pratiquement annulées : (*b*). Mais en revenant à 20°, (*c*), les réactions réapparaissent, avec

une amplitude égale sinon supérieure à celle d'avant. On peut

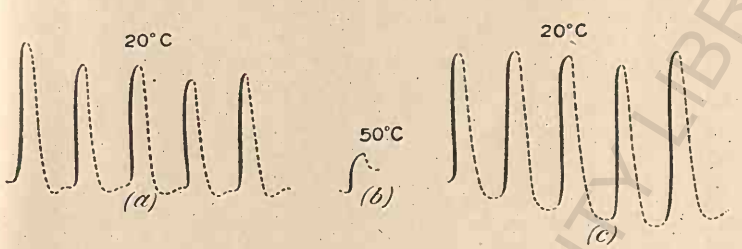



Fig. 101. — *Influence de la température sur les réactions d'une « cellule » photo-sensible.*

Lumination : 20 secondes. Obscurité : 40 secondes.

(*a*) Une suite de réactions, à 20° C. Le diagramme indique une légère fatigue.
(*b*) Réaction minime, irrégulière, à 50° C.
(*c*) Réactions lorsque la température est revenue à 20° C. Le diagramme indique un léger accroissement progressif.

même y remarquer un léger accroissement progressif, constituant un phénomène symétrique de la légère fatigue de (*a*).

**Influence du temps d'exposition.** — Si l'intensité de l'excitant est maintenue constante, l'amplitude des réactions d'une « cellule » sensible croît avec les temps d'exposition. Toutefois cet accroissement tend vers une limite, à partir de quoi l'allongement des temps ne fait plus croître les réactions. Et même, en prolongeant les temps, de la fatigue surviendrait, et les réactions déclineraient.

Les deux suites de courbes (*fig.* 102) illustrent ceci. De l'une à l'autre, les intensités lumineuses sont entre elles comme 1 est à 4, les distances de la source à la « cellule » étant respectivement 50 et 25$^{cm}$. Les réactions deviennent approximativement constantes pour les durées d'exposition dépassant 8 secondes. En même temps apparaît, à la fin de chaque réaction, une oscillation seconde.

BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY

Dans les mêmes conditions, les réactions d'une rétine présentent des phénomènes exactement parallèles.

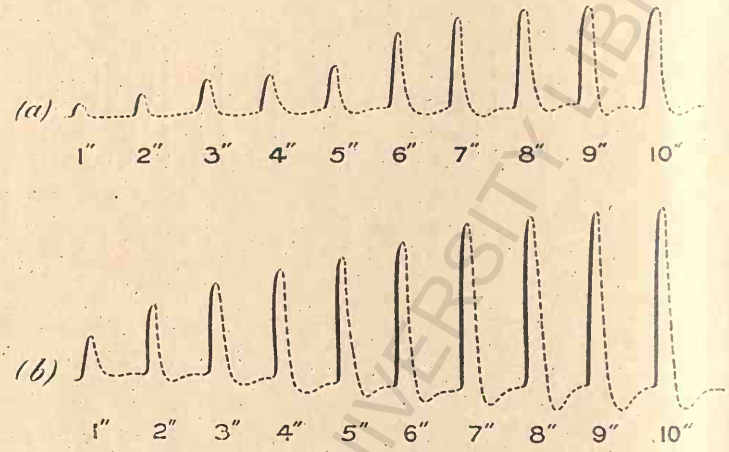



Fig. 102. — *Courbes de réaction d'une « cellule » photo-sensible, correspondant à des durées de lumination croissant de* 1 *à* 10 *secondes.*

(*a*) La source de lumière était à 50$^{cm}$ de la « cellule » photo-sensible.
(*b*) Source de lumière à 25$^{cm}$.
Noter la tendance à l'oscillation seconde.

**Relation entre les intensités de l'excitant lumineux et l'amplitude des réactions.** — Dans le cas d'une rétine, lorsque les intensités lumineuses croissent, l'amplitude des réactions croît aussi. Mais le phénomène n'est pas uniforme, c'est-à-dire que l'accroissement progressif des réactions n'est pas proportionnel à celui des luminations, et la courbe qui exprime la relation entre les intensités de l'excitant et l'amplitude des réactions est concave par rapport à l'axe où sont portées les intensités de l'excitant. La même chose est vraie de la sensation de la lumière, c'est-à-dire qu'entre des limites assez étendues, la sensation croît moins vite que l'excitant.

La même relation entre excitant et réaction se retrouve avec une « cellule » photo-sensible. J'ai pris comme source lumineuse constante un bec à incandescence, et les degrés des luminations étaient donnés et mesurés par les distances de la source

à la « cellule ». J'ai pris pour unité d'excitant la lumière à une distance de 150$^{cm}$. Dans l'éventualité d'une fatigue possible, j'ai recueilli deux séries de réactions (*fig.* 103). Dans la première,

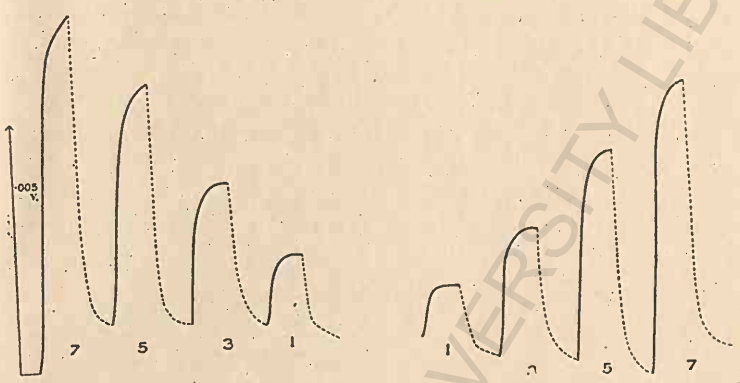



Fig. 103. — *Cellule photo-sensible.*
*Réactions à des intensités lumineuses variables.*

Le diagramme de gauche donne les réactions à des intensités de l'excitant qui sont entre elles comme 7, 5, 3 et 1.
Dans le diagramme de droite, les intensités de l'excitant sont entre elles comme 1, 3, 5 et 7.
Les traits pleins correspondent à des expositions d'une durée d'une minute, les traits pointillés correspondent à des retours à, ou vers, zéro, d'une minute.

les réactions ont été enregistrées pour des intensités de l'excitant décroissant de 7 à 1, et, dans la seconde, croissant de 1 à 7 :

TABLEAU DES RÉACTIONS POUR DES INTENSITÉS VARIABLES DE L'EXCITANT.

(L'intensité lumineuse d'un bec à incandescence placé à 150$^{cm}$ était prise comme unité.)

| Intensités lumineuses. | Réactions (lumière décroissante). | Réactions (lumière croissante). | Moyennes. | Valeurs en volts. |
|---|---|---|---|---|
| 7..... | 43 | 39 | 41 | 63 . $10^{-4}$ |
| 5..... | 31 ↓ | 29 ↑ | 30 | 46,1 » |
| 3..... | 18,5 | 17,5 | 18 | 27,7 » |
| 1..... | 10 | 9 | 9,5 | 14,6 » |

Le zéro s'étant légèrement déplacé pendant l'expérience, les amplitudes ont été mesurées, pour chaque réaction, à partir de la droite joignant le début de la réaction au dernier point du « retour ». L'amplitude moyenne a été donnée par la moyenne entre les amplitudes, dans l'une et dans l'autre série, correspondant à une même intensité lumineuse. L'écart entre elles, on le voit, est minime. Les amplitudes moyennes correspondant aux intensités 1, 3, 5, 7 sont 9, 5, 18, 30, 41. Si elles avaient été proportionnelles aux intensités lumineuses, elles eussent dû être 9,5, 28,5, 47,5, 66,5.

Dans un autre diagramme, pris avec une autre « cellule », pour des intensités lumineuses telles que 3, 5, 7, 9, j'ai eu des réactions d'amplitude 6, 10, 13, 15.

Les deux courbes de la figure 104 représentent la relation

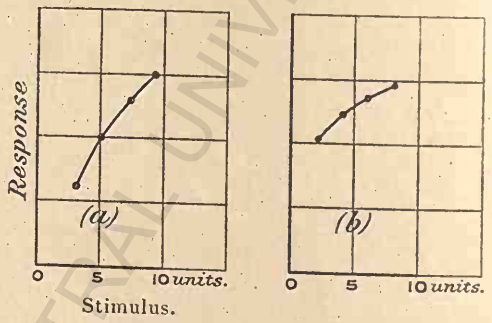



Fig. 104. — *Courbes représentant la relation entre les intensités lumineuses et les amplitudes des réactions.*

(*a*) « Cellule » photo-sensible.
(*b*) Rétine de grenouille.

entre les intensités lumineuses et l'amplitude des réactions, dans le cas d'une « cellule » inorganique (*a*), et d'une rétine (*b*) (Waller); et elles montrent que les amplitudes des réactions croissent moins vite que les intensités de l'excitant.

**Oscillation « seconde ».** — Nous avons vu que lorsque les temps d'exposition à la lumière croissent, les réactions électriques de

la surface métallique sensible atteignent un maximum, et s'y maintiennent quelque temps, puis, au delà, commencent à décliner, tout comme dans les autres cas où l'application de l'excitant est prolongée. L'apparition de ce déclin, et sa vitesse, dépendent de l'état particulier de la substance en cause.

Lorsque la surface métallique sensible a été notablement

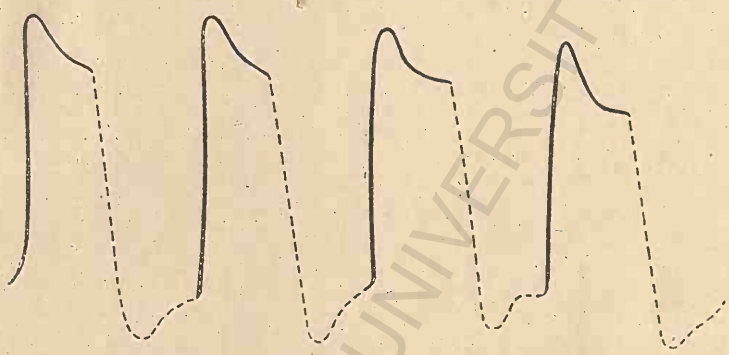


Fig. 105. — *Oscillations secondes.*

Lumination : 1 seconde. Obscurité : 1 seconde.
Noter le déclin après le maximum, pendant la lumination, et l'oscillation seconde, dans l'obscurité.

surexposée, et que l'on éteint la lumière, il y a détente brusque vers le zéro, et oscillation « seconde », c'est-à-dire que la courbe de la remise en état dépasse le zéro, et y revient ensuite lentement. Nous l'avons déjà vu à la figure 102. Le phénomène est accentué, figure 105, montrant le déclin des réactions, dû à une lumination trop prolongée, puis la chute de la courbe, suivie d'une oscillation seconde. On trouve, dans la vision, certaines analogies avec ce phénomène, et nous les indiquerons tout à l'heure.

**Anomalies des phénomènes de réaction.** — Nous avons déjà parlé des réactions rétiniennes normales, et de celles qui leur correspondent dans les réactions d'une « cellule » photo-sensible.

Mais une rétine subit une modification moléculaire lorsqu'elle est lésée, fatiguée, ou sur le point de mourir, et des modifications corrélatives, diversement compliquées, sont alors présentées par ses réactions :

1° *Petite réaction préliminaire, négative.* — Au moment où la lumière atteint la rétine d'une grenouille, on constate parfois une petite réaction temporaire négative, aussitôt suivie de la réaction normale positive.

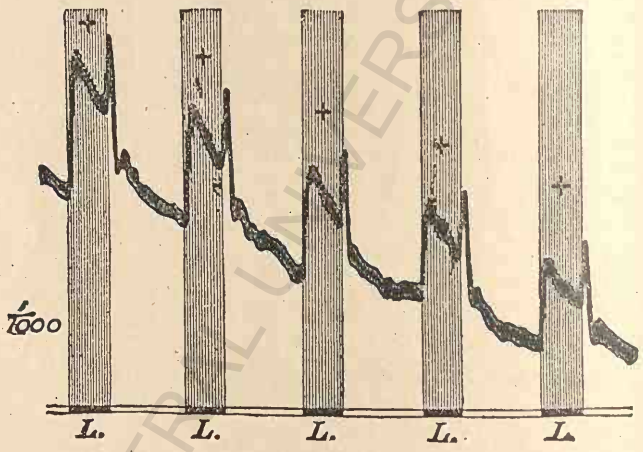



Fig. 106. — *Sursaut positif temporaire présenté par une rétine de grenouille, à l'interruption des éclairements* L (WALLER).

Ceci s'observe également avec une « cellule » photo-sensible [voir *fig.* 96 (*b*)].

2° *Renversement des réactions.* — Avec une rétine fatiguée, en raison des modifications moléculaires survenues, les réactions peuvent changer de signe, c'est-à-dire devenir négatives.

J'ai aussi trouvé, qu'en faisant travailler la même « cellule », les réactions pouvaient d'un jour à l'autre subir des renversements.

BCU IASI CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

3° *Réactions positives temporaires, à l'interruption de la lumière.* — Kuhne et Steiner ont constaté, avec les rétines, un autre phénomène intéressant. Au moment où cesse la lumination, le courant de réaction présente un sursaut soudain, juste avant

Fig. 107. — *Réactions d'une « cellule » d'argent.*

Les traits pleins représentent les réactions correspondant aux luminations (temps : une demi-minute).

Les traits pointillés correspondent aux remises en état, dans l'obscurité.

Noter le sursaut positif, à la fin de chaque réaction.

la remise ordinaire en état. Ceci se voit très bien à chacune des courbes de réaction du diagramme (*fig.* 106) enregistré par Waller. On remarquera qu'avec le début de l'éclairement la

BCU LAUSANNE CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

courbe monte, qu'avec la prolongation de l'excitation elle décline, puis qu'au moment où la lumière est interrompue la réaction a un sursaut positif temporaire.

Je mets à côté de ces courbes une suite d'autres courbes, ayant avec elles, jusque dans leurs anomalies, d'étroites analogies. Les dernières traduisent les réactions d'une « cellule » photo-sensible (*fig.* 107).

On peut rappeler ici que la petite réaction préliminaire négative et le sursaut positif à l'interruption de la lumière ont aussi été constatés par Minchin, avec les « cellules » photo-électriques.

4° *Déclin et renversement.* — Nous avons vu que sous l'action continue de la lumière, les réactions commençaient à décliner. Le phénomène est général. Parfois il est très rapide :

α) La réaction décline et tend vers zéro. Si à ce moment on éteint la lumière, la réaction fait une chute directe, dépasse le zéro, et y revient par une oscillation seconde [*fig.* 108 (*a*)].

β) Si l'exposition à la lumière a été plus prolongée, le déclin atteint le zéro, et passe en dessous en devenant, négatif. En interrompant alors la lumière, il y a d'abord un petit soubresaut négatif, puis bond vers le zéro, allant au delà, dans le sens positif [*fig.* 108 (*b*), (*c*)].

Tout ceci est bien parallèle à l'observation suivante faite par Dewar et Mc Kendrick : « Lorsque de la lumière diffuse pénètre dans l'œil d'une grenouille, et que le « régime » est établi, la force électromotrice naturelle croît d'abord, puis décline. En prolongeant l'action lumineuse, le courant diminue lentement jusqu'à une valeur à peu près constante. Si l'on vient à supprimer la lumière, la force électromotrice croît soudain, et reprend presque sa valeur initiale (1). »

γ) Parfois j'ai noté le résultat intéressant que voici. A l'arrivée de la lumière sur la « cellule » sensible, on constate une réaction ascendante. Avec la prolongation de l'éclairement, la réaction

(1) *Proc. Roy. Soc. Edinb.*, 1873, p. 153.

décline, s'annule, et reste au zéro, même si l'on prolonge encore l'application de l'excitant. Mais à l'interruption, ou « rupture » de l'excitant lumineux, il y a une réaction descendante, suivie de la remise ordinaire en état.

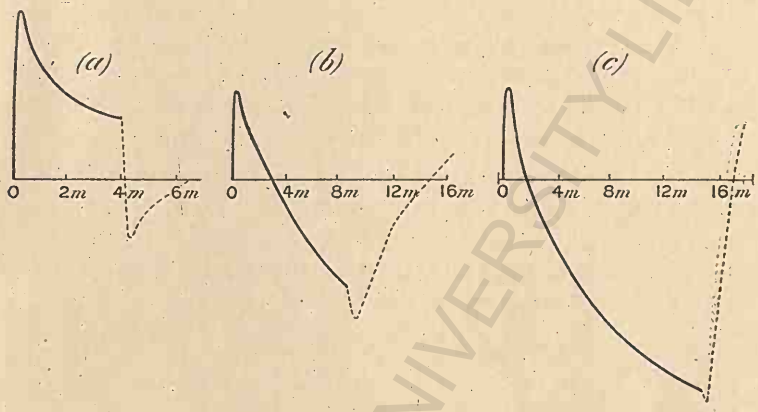



Fig. 108. — *Déclin des réactions par des expositions prolongées.*

(*a*) Déclin tendant vers le zéro. A l'extinction de la lumière, chute au-dessous du zéro, et oscillation seconde.

(*b*) Déclin jusqu'au-dessous du zéro. A l'extinction de la lumière, retour vers le zéro, après petit sursaut négatif.

(*c*) Le même, plus accentué. Le sursaut négatif tend à disparaître.

Il se produit quelque chose d'analogue dans l'action d'un courant constant sur un muscle. A la fermeture du courant, le muscle se contracte à nouveau.

**Résumé.** — Tout ce qui précède montre qu'un excitant lumineux provoque, dans une « cellule » photo-sensible, inorganique, des réactions en tout point semblables à celles d'une rétine vivante.

Pour les deux, en effet :

En conditions normales, on a des variations positives;

L'amplitude des réactions croît (jusqu'à une certaine limite) avec les temps d'exposition;

BCU LAUSANNE - CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

L'amplitude des réactions est affectée, de la même manière, par la température;

On constate une fatigue relativement minime;

L'accroissement des réactions pour les accroissements de l'excitant est le même;

Même dans les anomalies : — renversement des réactions, petite réaction négative, au début; sursaut positif terminal, à l'interruption de la lumière; déclin et renversement par excitation continue; — les phénomènes sont parallèles.

Entre ces anomalies, il y a des relations dignes de remarque. Si les « zéros » sont bien réellement constants, il est aisé de comprendre que lorsqu'une courbe de réaction est parvenue à son maximum, et que l'on « coupe » la lumière, le retour au zéro doit se faire en *descendant* (*fig.* 109, *a*). On comprend aussi

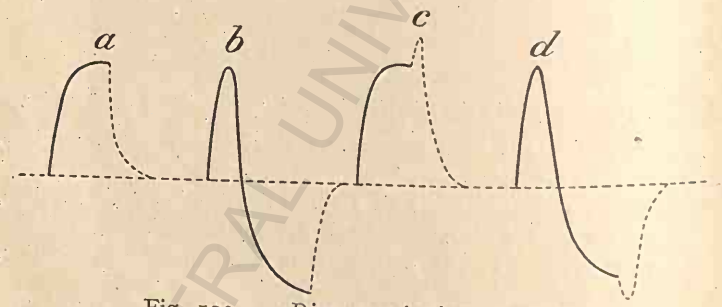



Fig. 109. — *Diverses réactions secondes (après excitation lumineuse).*

qu'après un renversement, le retour au zéro soit, au contraire, *ascendant* (*fig.* 109, *b*). Mais ce qui est plus curieux, c'est qu'à l'interruption dans la lumière, nous ayons parfois un petit sursaut, soit positif (*fig.* 109, *c*; voir aussi *fig.* 107), soit négatif (*fig.* 109, *d*; voir aussi *fig.* 108, *b*). Et dans les deux cas, les sursauts s'éloignent de la ligne des zéros.

Bref, il n'y a point, parmi les réactions, normales ou anormales, de la rétine, un seul phénomène qui n'ait son correspondant exact dans les réactions d'une « cellule » photo-sensible inorganique.

# CHAPITRE XIX.

## ANALOGIES AVEC LES PHÉNOMÈNES DE LA VISION.

Action d'un éclairement bref. — Oscillation « seconde ». — Images « secondes », positives ou négatives (contrastes successifs). — Alternances dans la vision binoculaire. — Influence de l'état physique de l'œil. — Reviviscence des images « secondes ». — Impressions visuelles inconscientes.

Nous avons déjà parlé de la théorie électrique de l'impression visuelle. Nous avons vu qu'un excitant lumineux provoque une réaction électrique temporaire, non seulement dans une rétine, mais encore dans son substitut inorganique. La lumière donne donc, avec l'impression visuelle, une « impression » électrique, et il n'est point improbable que les deux ne soient qu'une seule et même chose.

Lorsque ensuite varient les intensités de l'excitant lumineux, varient aussi les amplitudes correspondantes des réactions électriques, et les courbes qui représentent les relations entre excitant et réaction sont pareilles, en général, aux courbes correspondantes de la sensation visuelle.

Nous allons voir maintenant que la théorie électrique ne se borne pas à donner une explication simple des phénomènes *habituels* de la vision, mais qu'elle est aussi profondément suggestive à l'égard d'autres phénomènes fort obscurs.

Si les deux faces de notre « cellule » photo-sensible, en argent, sont en état physique, moléculaire, identique, elles ne donneront lieu à aucun courant. En pratique, cependant, c'est rarement le cas. Il y a généralement, entre elles, une légère différence, et le circuit est parcouru par un faible courant,

BCU LAUSANNE UNIVERSITY LIBRARY

auquel s'ajoute algébriquement l'action de la lumière. Cette action peut ainsi accroître le courant existant déjà dans l'obscurité (variation positive). En interrompant la lumière, on voit disparaître le courant de réaction, et subsister seulement le faible courant initial.

De même, dans le cas de la rétine, il est intéressant de noter qu'en fermant bien les yeux, on n'a cependant pas la sensation d'une obscurité absolue, mais, en général, celle d'une très faible lumière, appelée lumière propre de la rétine. L'action de l'excitant du dehors vient s'ajouter à cette lumière, et, de leur sommation algébrique, résultent des phénomènes qui seront indiqués plus loin.

**Action d'un éclairement bref.** — Si nous envoyons sur une « cellule » sensible un éclairement bref, l'effet produit n'est pas

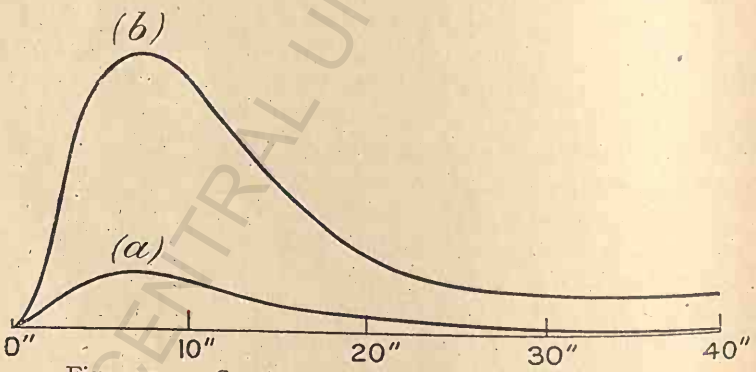



Fig. 110. — *Courbe de réaction d'une « cellule » d'argent photo-sensible.*

L'amplitude de la réaction « seconde » croît avec l'intensité de l'excitant.

(*a*) Brève exposition de 2 secondes à une lumière d'intensité 1.
(*b*) Même exposition de 2 secondes à une lumière d'intensité 9.

instantané, mais croît avec le temps. Il atteint son maximum quelque temps après l'éclairement, puis s'atténue peu à peu.

BCU LAUSANNE CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

De plus, nous avons vu précédemment, à propos des perturbations mécaniques, que la durée d'une réaction « seconde » est un peu plus grande lorsque l'excitant est plus intense.

Il en est de même pour la réaction « seconde » provoquée par un excitant lumineux. Ceci est exprimé par les deux courbes ci-contre (voir *fig.* 110), exprimant les réactions d'une « cellule » sensible en argent.

Pour la vision, en ce qui concerne le premier point, c'est-à-dire que la réaction atteint son maximum quelque temps après la cessation d'un éclairement bref, l'expérience peut être faite de la manière suivante. A l'extrémité d'un tube opaque est fixé un disque de verre, enduit de noir de fumée, et où quelques mots transparents ont été tracés avec la pointe d'une épingle. On a donné au tube une longueur telle qu'en plaçant l'œil à l'autre extrémité, le disque de verre se trouve à la distance de la vision optima. On interpose un obturateur photographique entre l'œil et le disque. On dirige le disque vers une forte lumière, et l'on déclenche l'obturateur. En fermant l'œil aussitôt après, on n'éprouvera d'abord aucune impression visuelle bien définie. Mais au bout d'un peu de temps, apparaissent, lumineux, les caractères tracés sur le disque noirci, qui atteignent un éclat maximum, puis s'atténuent et s'effacent peu à peu.

Dans cette expérience, l'excitant est d'application brève, la lumière ayant été « coupée » avant que la réaction provoquée ait pu atteindre son maximum. La réaction seconde, ici, est positive, car il n'y a eu ni renversement ni obscurité entre l'image directe et l'image seconde, celle-ci étant simplement la continuation de la première. Mais nous verrons plus loin que si la lumière est « coupée » plus tard, après que l'image première ait atteint son maximum, l'image seconde qui suit aussitôt est négative.

Les persistances respectives des réactions secondes provoquées par des éclairements d'intensité différente peuvent être perçues de la façon suivante. Avec de la poudre de magnésium, on fait un large dessin sur un tableau noir, et on l'enflamme dans une chambre obscure, devant un observateur qui ne sait pas ce

qui a été tracé. L'éclair est beaucoup trop bref pour en permettre la perception détaillée, qui est gênée en outre par la fumée de la combustion. Mais si l'on ferme les yeux immédiatement après l'éclair, la sensation atténuée, due à la fumée, disparaîtra d'abord, et laissera ensuite subsister, bien claire, l'image seconde du dessin, qui pourra dès lors être lue distinctement.

Souvent, en fermant ainsi les yeux, j'ai pu distinguer nettement des phénomènes lumineux, qu'il eût été impossible de percevoir autrement, soit qu'ils fussent trop rapides, soit qu'ils fussent trop éclatants (1).

**Oscillation seconde.** — Nous avons vu que lorsqu'une « cellule » d'argent a été, pendant un certain temps, l'objet d'un éclairement intense, le courant de réaction croît et atteint un maximum, et qu'en éteignant alors la lumière, il y a un retour immédiat au zéro. Ce retour peut même dépasser le zéro, ce qui donne lieu à une oscillation seconde (*fig.* 105).

Dans le cas où il y aurait eu un courant initial minime, le courant second viendrait se sommer algébriquement avec lui, et le courant résultant serait alternativement plus faible et plus intense que ce courant initial.

**Contrastes successifs.** — Transposé dans le domaine de la vision, ce qui précède veut dire qu'il se produirait une série d'images secondes alternées. Après une exposition brève, la suppression de la lumière est suivie d'une réaction seconde positive; mais après une exposition longue, la suppression d'une lumière vive est immédiatement suivie d'une chute, et d'une

(1) Je puis mentionner, comme exemple, une expérience sur des métaux en fusion, faite à la « Royal Institution », en 1901, par Sir W.-Roberts Austen, et à laquelle j'assistais. En raison de l'éclat de la lumière et des épaisses fumées, il était impossible de voir ce qui se passait dans le creuset, mais j'ai pu en saisir tous les détails *en fermant les yeux*. La vision de la fumée, moins lumineuse, disparut la première, laissant sur ma rétine une image seconde du métal fondu, qui devint de plus en plus nette.

réaction négative. Puis, cette impulsion est suivie elle-même d'une impulsion inverse, positive, donnant une sensation de clarté; et ainsi de suite.

En effet, en regardant, pendant un certain temps, un objet très brillant, de préférence avec un seul œil, puis en fermant cet œil, on a une sensation immédiate de noir, suivie d'une sensation de clarté. Et ces apparences alternées se renouvellent et constituent le phénomène dit des *contrastes successifs*.

Avec les yeux fermés, ce sont les alternances positives, lumineuses, qui sont les plus visibles. Mais on peut faire l'expérience d'une manière un peu différente, et, après avoir regardé fixement une lumière vive, jeter les regards sur un mur bien éclairé. Alors ce sont les alternances sombres, négatives, qui se distinguent le mieux.

Et en regardant un mur faiblement éclairé, les deux alternances, lumineuse et sombre, se distinguent également bien, alternativement.

On explique d'ordinaire la réaction négative par une fatigue. On suppose que l'état d'une rétine affectée par la lumière est un état de fatigue, et que l'image négative résulte d'une sorte d'épuisement. Par épuisement, on entend soit la présence de produits spéciaux, soit la désagrégation du tissu sensible, soit les deux.

Si tel est le cas, il faut s'attendre à ce que la fatigue et l'image négative liée à elle disparaissent peu à peu avec le retour de la rétine à l'état normal. Or ce n'est pas ce qui arrive, puisqu'il se produit une alternance répétée d'images négatives et d'images positives. La théorie de la fatigue est donc incapable d'expliquer le phénomène.

Dans une « cellule » sensible, en argent, la déformation moléculaire due à l'action de la lumière donne lieu à un courant de réaction, et, à la suppression brusque de l'excitant, succède une oscillation seconde. Les réactions secondes, alternées, de la rétine relèvent d'un processus exactement pareil.

**Alternances dans la vision binoculaire.** — En expérimentant sur les contrastes successifs, j'ai découvert ce fait curieux

qu'à l'état normal nos deux yeux ne voient pas, au même moment, d'une manière identique, mais que la vision de chacun d'eux subit des fluctuations, en restant complémentaire de celle de l'autre, c'est-à-dire que leur somme est approximativement constante. Tout se passe comme si les yeux s'arrangeaient pour regarder et pour se reposer, alternativement. Cette division du travail, dans la vision binoculaire, est un avantage certain.

De nos deux rétines il y en a toujours une où la sensation

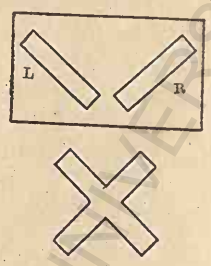



Fig. 111. — *Dessin stéréoscopique* (*réduit*).

atteint son maximum avec un retard sur l'autre, égal à la moitié du temps d'établissement. On peut le montrer à l'aide d'un stéréoscope, portant, au lieu de vues stéréoscopiques, un dessin incisé, que l'on tournera ensuite vers une lumière. Ce dessin consiste en deux bandes étroites, inclinées l'une à droite R, et l'autre à gauche L, et situées à une distance convenable l'une de l'autre (*fig.* 111). Lorsque ce dessin est mis dans le stéréoscope l'œil droit perçoit R, l'œil gauche perçoit L, puis, les images des deux incisions se superposent, et l'on voit une croix (×). Si le stéréoscope, ainsi pourvu, est tourné vers le ciel, et qu'on regarde fixement la croix pendant un certain temps, on voit, en raison des alternances dont nous avons parlé, l'éclat de l'un des bras de la croix s'atténuer, pendant que celui de l'autre s'accentue, et *vice versa*.

Ces fluctuations alternées sont encore plus nettes si l'on ferme les yeux, car les oscillations secondes en sont accentuées. Après avoir regardé dans le stéréoscope pendant 10 secondes

ou plus, on ferme les yeux. La première réaction constatée est sombre, en raison du retour vers le zéro. Puis *l'une* des deux droites de la croix lumineuse se projette de biais sur le champ sombre de la rétine, et disparaît lentement. Alors *l'autre* droite (perçue par l'autre œil) apparaît tout à coup, croisant la direction de la précédente; etc... Ces alternances se répètent pendant un temps assez long, et donnent l'aspect curieux de deux lames brillantes qui se croisent et se recroisent.

On peut se rendre compte de ces alternances, d'une manière plus frappante encore, en remplaçant, dans le stéréoscope, les deux incisions précédentes par deux groupes de lettres, et en les regardant avec les deux yeux. Le résultat est un ensemble rendu confus par la superposition des images, et rien n'est lisible. Mais en fermant les yeux, les éléments composants apparaissent alternativement, et peuvent dès lors être lus.

La durée d'alternance varie avec l'âge, et avec l'état de l'œil. Elle est, en général, moindre dans la jeunesse. Je l'ai vue varier, d'un individu à l'autre, de 1 à 10 secondes ou davantage. La durée la plus fréquente est d'environ 4 secondes. De plus, pour un même individu, elle varie un peu avec les conditions antérieures d'activité ou de repos. C'est le matin, au réveil, qu'elle est la plus brève. On m'a transmis les observations suivantes :

| Heures. | Durées (en secondes). |
|---|---|
| 8 | 3 |
| 12 | 4 |
| 15 | 5 |
| 18 | 5,4 |
| 21 | 5,6 |
| 23 | 6,5 |

Dans le même ordre d'idées, si l'on refroidit un œil et qu'on réchauffe l'autre, les oscillations rétiniennes sont plus rapides dans l'un que dans l'autre. L'oscillation la plus rapide atteint et dépasse l'autre, et l'on a ainsi le curieux phénomène des « battements » visuels.

**Reviviscence des images secondes.** — Dans l'expérience précédente, les images secondes des traits croisés, vues avec les yeux fermés, sont d'abord très nettes. Elles sont si nettes que toutes les petites irrégularités des contours découpés apparaissent distinctement. On ne peut donc concevoir aucun doute au sujet du caractère objectif de l'impression produite sur la rétine, impression qui, à la suppression brusque de l'excitant, donne lieu aux oscillations secondes et aux contrastes successifs. Ces alternances successives sont un témoignage de la déformation physique du milieu rétinien.

Après avoir été très nettes, les images alternées successives s'atténuent de plus en plus. Un moment arrive où il est difficile de dire si l'image est bien encore due à un effet second objectif, ou simplement à un phénomène de « mémoire ». En fait, il n'y a pas, entre les deux phénomènes, de démarcation bien tranchée, l'un se continue par l'autre, et les alternances successives de ces images « mnémoniques » montrent avec évidence qu'elles sont dues à une déformation objective du milieu rétinien.

Il est intéressant de noter à ce propos que certains phénomènes dus exclusivement à la mémoire présentent aussi des alternances successives : « Certaines sensations qui ne procèdent point d'une action du dehors sont d'ordinaire groupées, par raison de commodité, sous ce terme : mémoire. Si l'on ferme les yeux, et que l'on essaie d'évoquer un tableau, on verra que l'image ne peut être maintenue, mais qu'elle apparaîtra et disparaîtra à plusieurs reprises [1]. »

Les contrastes successifs persistent parfois assez longtemps. D'ordinaire, de la fatigue survient, et les images disparaissent. Mais elles peuvent réapparaître longtemps après, au moment le plus inattendu. Dans un cas de ce genre, elles revinrent en rêve trois semaines après l'impression initiale.

Dans le même domaine, la réapparition, les yeux clos, la nuit, des images qui, dans le jour, ont frappé nos regards, est un phénomène extrêmement intéressant.

---

[1] E.-W. SCRIPTURE, *The new Physiology*, p. 101.

**Impressions visuelles inconscientes.** — Alors que je répétais des expériences sur les contrastes successifs, le phénomène précédent se présenta à moi d'une manière remarquable et très inattendue.

J'avais concentré mes regards sur une fenêtre particulière, et obtenu d'elle des images secondes, en fermant les yeux. Toute mon attention était accaparée par la fenêtre, et je ne percevais rien d'autre qu'elle, ou ses images secondes. Après avoir répété ceci plusieurs fois, il m'arriva, en raison de la fatigue d'une certaine région de ma rétine, qu'après avoir fermé les yeux, je n'aperçus plus d'image seconde de la fenêtre. Mais à la place vint se dessiner distinctement une ouverture circulaire vitrée, où je remarquai même les contours aigus d'une vitre brisée.

J'ignorais l'existence de cette ouverture, située beaucoup plus haut, dans le mur. Son image s'était imprimée sur ma rétine, à mon insu, et avait évidemment donné lieu aussi à des images secondes, mais qui n'avaient pas atteint ma conscience, parce que le champ principal de ma vision seconde était occupé, et que les images de la fenêtre absorbaient toute mon attention. Lorsque ces images vinrent à manquer, le champ de ma vision seconde fut libéré d'autant, et il me fut donné d'apercevoir ce que je ne voyais pas auparavant.

Il semble donc qu'en plus des images qui impressionnent notre rétine, et dont nous avons conscience, il y en a d'autres qui viennent s'y imprimer sans que nous en ayons connaissance, parce que notre attention est occupée ailleurs. Mais plus tard, l'esprit s'étant détendu, ces impressions peuvent surgir tout à coup par le phénomène du contraste successif.

L'observation que nous venons de donner peut aider à expliquer certains phénomènes, relatifs aux « visions » et aux hallucinations qu'on ne peut attribuer à aucun état pathologique. Dans les cas en question, les phénomènes produits semblent n'avoir aucune origine objective. Mais si l'on pense aux nombreuses images qui ont impressionné la rétine sans que le sujet en ait eu conscience, il n'apparaît point comme invraisemblable que les « visions » n'en soient la conséquence.

# CHAPITRE XX.

## RÉSUMÉ GÉNÉRAL ET CONCLUSION.

Nous avons vu qu'un excitant, appliqué à une matière vivante, la modifie, et que l'état d'excitation ainsi provoqué peut, comme dans le muscle, se traduire par un changement de forme. En d'autres tissus, tel que le nerf, ou la rétine, il ne se produit pas de changement visible, mais la perturbation due à l'excitant se manifeste électriquement. Et tandis que la manifestation motrice des réactions ne se présente que d'une manière restreinte, la manifestation électrique est générale.

Que l'irritabilité d'un tissu soit représentée par ses réactions électriques, ou par ses réactions motrices, nous avons trouvé qu'elle était liée à son activité physiologique. Sous certaines conditions les réactions peuvent être abolies, soit temporairement, par les anesthésiques, soit définitivement par les toxiques. Lorsque, par un moyen quelconque, un tissu a été privé, définitivement, de toute capacité de réagir, on dit qu'il a été tué.

De l'abolition des réactions d'un tissu tué, et d'une confusion faite entre choses mortes et matière inanimée, on avait tacitement admis que la matière inorganique était, tout comme un tissu mort, incapable de réagir à aucun excitant. Nous avons montré que cette supposition était entièrement gratuite.

« Cette conception, inexpliquée, de l'irritabilité devint, dit Verworn [1], le point de départ du *vitalisme*, qui, dans sa forme la plus complète, affirmait le dualisme de la Nature vivante et de la Nature non vivante.... Les vitalistes laissèrent vite de

[1] Verworn, *General Physiology*, p. 18.

côté, plus ou moins complètement, l'explication mécanique et chimique des phénomènes vitaux, et lui substituèrent une force hypermécanique, inconnue et inconnaissable, réglant tout. Et tandis que, dans la matière non vivante les phénomènes sont causés par l'action des forces physiques et chimiques, dans les organismes vivants ils étaient induits et dirigés par cette autre force spéciale.

» Les vitalistes suivants ne cherchèrent pourtant pas à analyser la nature de cette force vitale. Ils s'en servirent d'une manière toute mystique, pour expliquer commodément tous les phénomènes vitaux.... Au lieu d'une véritable explication, une simple expression, « force vitale », était tenue pour satisfaisante, en désignant une force mystique, appartenant aux seuls organismes. Il était dès lors très aisé « d'expliquer » les phénomènes vitaux les plus complexes. »

Cela étant, le dualisme ayant posé le principe du caractère supraphysique des réactions de la matière vivante, il est évident que la découverte de réactions, d'un caractère identique, dans la matière inorganique, ruine tout le système.

Les Chapitres précédents ont montré que ce n'est pas seulement le fait même de la réaction que, tout comme les tissus animaux, présentent les plantes et les métaux, mais que toutes les modalités, sous diverses influences, des réactions du premier groupe, se retrouvent dans les réactions des deux derniers.

Nous allons esquisser un résumé général de ces phénomènes, tels que les présentent les trois classes de matières.

Nous avons vu que, dans un tissu animal vivant, l'onde de perturbation moléculaire due à l'excitant, est accompagnée d'une onde de perturbation électrique; que dans certains types de tissus, le tissu le plus excité se comportait comme positif à l'égard du tissu le moins excité, et que, pour d'autres types, c'était l'inverse; que, pour obtenir une réaction électrique, il était essentiel que les contacts reliés au galvanomètre fussent inégalement affectés par l'excitant, et que ceci était obtenu, soit : 1° en lésant l'un des contacts, ce qui diminuait l'effet de

l'excitant; soit, 2°, en disposant, entre les deux contacts, un « block » parfait, de manière que l'excitation produite pût atteindre l'un d'eux, et non l'autre.

On a vu ensuite que ce phénomène caractéristique de la réaction électrique n'était pas exclusif aux tissus animaux, mais que les tissus végétaux le possédaient aussi, avec les mêmes particularités, et révélé par les mêmes procédés de lésion ou de « block ».

Enfin, en passant aux matières inorganiques, et en nous servant des mêmes dispositifs expérimentaux, nous avons trouvé, avec les métaux, les mêmes réactions électriques.

**Variation négative.** — Dans tous les cas, animal, végétal ou métal, on peut obtenir des réactions par la méthode dite de la variation négative, en diminuant l'excitabilité de l'un des deux contacts par un moyen physique ou chimique. Un léger courant s'ensuit. L'application d'un excitant provoque alors, dans ce courant, une variation négative, dont l'amplitude dépend de l'intensité de l'excitant (voir *fig.* 4, 7, 54).

**Relation entre les intensités de l'excitant et l'amplitude des réactions.** — Avec les trois classes de matières, on trouve que l'amplitude des réactions croît avec les intensités de l'excitant. Cependant, pour une valeur élevée de l'excitant, la réaction tend vers une limite (*fig.* 30, 32, 84).

La loi, connue sous le nom de loi de Weber-Fechner, montre qu'il en est de même pour la relation entre excitant et sensation. Et si la sensation est la mesure de la réaction physiologique, on peut comprendre la correspondance entre les courbes des réactions physiologiques d'une part, et celles de la sensation d'autre part.

Enfin nous savons que les phénomènes physiologiques eux-mêmes se ramènent, en fin de compte, à de simples phénomènes physiques.

**Effets d'addition et de « superposition » des excitants.** — Pour les trois classes de corps, des excitants individuellement

inefficaces provoquent des réactions effectives lorsqu'on les « superpose ».

De plus, la sommation d'excitants qui se succèdent rapidement engendre un effet d'amplitude maxima, auquel des excitants ultérieurs n'ajoutent rien, comme si cet effet était équilibré par un effet antagoniste (*fig.* 17, 18, 86).

**Réactions successives d'amplitude constante.** — Pour les trois classes de corps, on rencontre un premier type de réac-

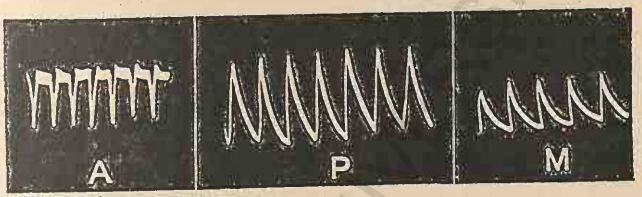



Fig. 112. — *Réactions successives d'amplitude constante :* A, *d'un nerf;* P, *d'une plante;* M, *d'un métal.*

Les réactions normales d'un nerf sont représentées avec les sommets en bas.

Dans cette figure, ainsi que dans les suivantes, A désigne les réactions d'un animal, P d'une plante, et M d'un métal.

tions, où elles se succèdent en gardant une amplitude constante (*fig.* 112).

**Fatigue : Réactions successives d'amplitude décroissante.** — Un autre type de réactions se présente, lorsque survient de la fatigue.

Jusqu'ici, on expliquait la fatigue d'un tissu animal par sa désassimilation ou désagrégation, compliquée par la présence de produits de déchet. Et l'on expliquait la remise en état par la réfection du tissu, grâce aux matériaux apportés par la circulation.

Cette explication est manifestement inexacte, car même dans un muscle excisé et exsangue, la remise en état est obtenue par un court repos. De plus, toutes les modalités de la fatigue

se retrouvent, non seulement avec les plantes, mais avec les métaux, de sorte que la cause première du phénomène n'est évidemment pas celle qu'on avait invoquée (*fig.* 113).

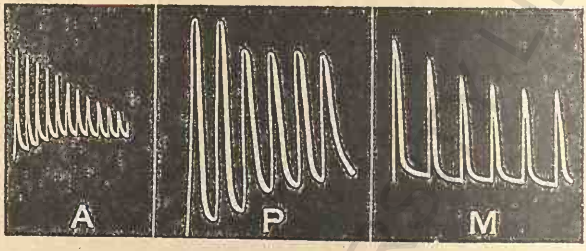



Fig. 113. — *Fatigue :* A, *d'un muscle;* P, *d'une plante;* M, *d'un métal.*

Nous avons montré, au contraire, que cette cause première résidait dans l'addition des déformations résiduelles du milieu, et qu'un court repos, leur permettant de se dissiper, dissipait en même temps les signes de fatigue.

**Réactions successives d'amplitude croissante.** — Cette théorie de la désassimilation, d'après laquelle l'application d'un exci-

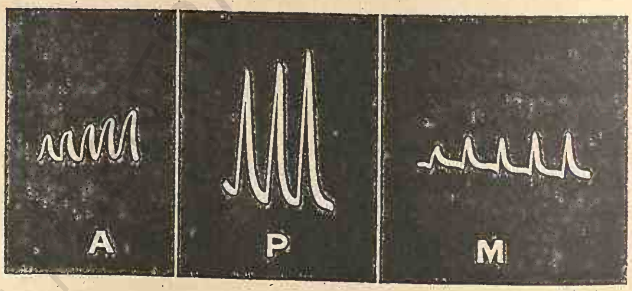


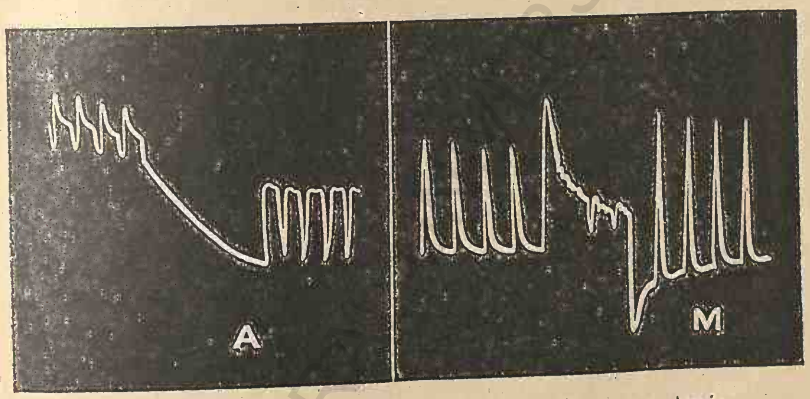

Fig. 114. — *Réactions successives d'amplitude croissante, d'un muscle, d'une plante et d'un métal.*

tant engendrait une fatigue en désorganisant l'activité fonctionnelle, est directement contredite par les circonstances

connues où des excitants successifs égaux provoquent des réactions successives d'amplitude croissante.

Nous avons retrouvé le même phénomène avec les plantes et les métaux, et où, selon toute apparence, les accroissements constatés étaient dus à une diminution progressive de l'inertie moléculaire (*fig.* 114).

**Réactions accrues après excitations tétanisantes.** — On obtient un résultat analogue, c'est-à-dire un accroissement de l'amplitude des réactions, par une application préalable




Avant. Après. Avant. Après.

Fig. 115. — *Réactions normales d'un nerf et d'un métal, accrues après une série d'excitants tétanisants.*

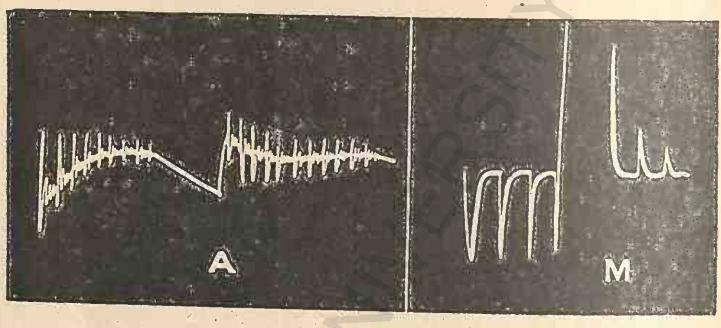
(Les réactions normales d'un tissu animal ont leurs sommets en haut, et celles d'un métal, en bas.)

d'excitations tétanisantes, qui augmentent la mobilité moléculaire. Les métaux présentent ce phénomène, aussi bien que les tissus animaux (*fig.* 115).

**Réactions « modifiées » (inversées).** — Nous avons vu que les réactions normales d'un nerf, qui sont négatives, peuvent changer de signe, lorsqu'il est fatigué; les réactions positives

d'une rétine normale deviennent négatives dans les mêmes conditions.

Nous avons trouvé que lorsqu'une plante se fane, il est fréquent de lui voir également des réactions positives, au lieu des réactions ordinaires, négatives (*fig.* 28). Lorsqu'elle est près de mourir, ou encore en la soumettant à des températures




Avant. Après. Avant. Après.

Fig. 116. — *Réactions anormales d'un nerf* A *et d'un métal* M, *converties en réactions normales, après une série d'excitations tétanisantes.*

A est le diagramme des réactions d'un nerf. Le galvanomètre enregistreur, n'étant pas apériodique, laisse voir des oscillations secondes. Les réactions anormales (sommets en haut) deviennent normales (sommets en bas) après tétanisation.

M est le diagramme des réactions d'un métal. Les réactions anormales (sommets en bas) deviennent normales (sommets en haut) après tétanisation.

extrêmes, ses réactions peuvent aussi présenter le même renversement.

Le renversement des réactions est dû à une modification moléculaire particulière. Nous l'avons aussi trouvé aux réactions des métaux.

Toutes ces réactions « modifiées » peuvent être ramenées à leur sens normal par des excitants énergiques, ou appliqués longtemps (*fig.* 116).

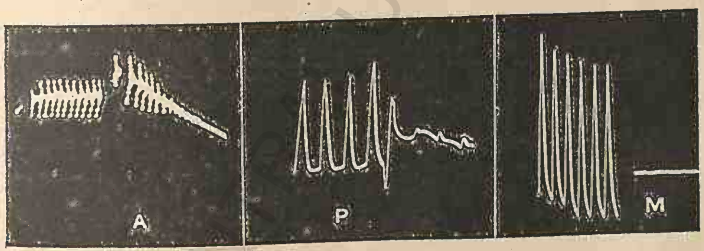
**Variations à deux alternances.** — Un nerf présente une variation à deux alternances, lorsque l'onde de perturbation moléculaire n'atteint pas les deux contacts au même moment, ou lorsqu'en ces points l'excitation est de degré différent.

On constate la même variation à deux alternances, dans les mêmes conditions, avec les plantes, et les métaux (*fig.* 26, 68).

**Influence de la température.** — Les réactions d'un tissu animal s'affaiblissent aux basses températures. Puis, pour une certaine température optima, les réactions connaissent leur maximum. Elles sont, de nouveau, très réduites, au delà d'une autre température, élevée.

Nous avons constaté le même phénomène avec les plantes. Pour les métaux aussi, aux températures élevées, les réactions sont très diminuées (*fig.* 38, 65).

**Effet des agents chimiques.** — Les réactions d'un tissu animal voient leur amplitude accrue par l'application de




Avant. ↑ Après. Avant. ↑ Après. Avant. ↑ Après.

Fig. 117. — *Abolition des réactions d'un nerf, d'une plante et d'un métal, par l'effet du même toxique.*

La première moitié de chacun des trois diagrammes reproduit les réactions à l'état normal. La deuxième moitié, l'abolition des mêmes réactions après application du toxique.

stimulants, diminuée par des substances déprimantes, ou annulée par des toxiques; et les réactions des plantes et celles des métaux présentent les mêmes phénomènes.

Nous avons vu que l'on considérait comme critère de la nature vitale des réactions leur abolition par certains agents dits toxiques. Nous trouvons cependant que les toxiques abolissent aussi les réactions des plantes et celles des métaux (*fig.* 117). Puis, de même qu'un tissu animal possède, tant qu'il vit, la propriété de réagir, et la perd lorsqu'il est tué par des toxiques, de même un métal doué de réactions perd cette propriété par application des mêmes toxiques.

L'influence de la dose rend le parallèle plus frappant encore. On sait que la même substance, administrée à un tissu animal, peut avoir des effets opposés, suivant qu'elle est prise à haute ou à faible dose. Et nous avons vu plus haut que ceci est aussi le cas pour les plantes et pour les métaux.

**Action de la lumière.** — Il n'est pas jusqu'aux réactions d'un organe aussi hautement différencié que la rétine qui ne trouvent leur parallèle dans les réactions de la matière inorganique. On a vu comment un excitant lumineux provoque, dans une rétine artificielle, des réactions qui suivent, dans tous leurs détails, celles provoquées dans une rétine vivante. Telles : la répétition efficace d'excitants individuellement insuffisants; la relation entre l'excitant et la réaction; l'influence de la température sur les réactions; et aussi le phénomène des oscillations secondes. Enfin, ressemblance plus étroite encore : même les anomalies des réactions rétiniennes ont leurs correspondantes dans les réactions de la rétine de métal.

**Conclusion.** — Les réactions de la matière vivante, jusqu'en toutes leurs modalités, ne sont donc qu'une réplique des réactions de la matière inorganique. Il n'y a là ni mystère ni caprice, ainsi que nous devrions au contraire l'admettre avec l'hypothèse d'une force vitale extra-mécanique, agissant en contradiction avec les lois physiques qui régissent le monde matériel. Nulle part, dans l'ensemble des phénomènes de réaction, comprenant ceux des métaux, des plantes, et des animaux, on ne peut déceler une solution de continuité. L'étude de processus évidemment aussi complexes que ceux de l'irrita-

bilité, rencontre, on doit s'y attendre, de nombreuses difficultés. Mais, pour les surmonter, il faut y faire face, et les analyser patiemment, comme en toute recherche de science, sans faire appel à ces forces spéciales, dont la qualité, vraiment commode, est d'être vague au point de pouvoir répondre à toutes les conjonctures. Et si nous voulons arriver à comprendre quelque chose au mécanisme compliqué de la machine animale, il faut, à tout le moins, cesser délibérément d'esquiver ses problèmes, en recourant à de simples mots qui, en réalité, n'expliquent rien.

Loin d'avoir besoin de l'hypothèse d'une force vitale, les phénomènes de réaction ne sont, bien au contraire, que des phénomènes physico-chimiques, justiciables d'une recherche aussi précise que ceux de n'importe quel autre domaine physique.

Les physiologistes nous ont appris à lire dans les courbes de réaction toute l'influence des actions du dehors, conditions du phénomène de la vie. Les diagrammes nous permettent de suivre la diminution progressive des réactions due à la fatigue, ou aux températures extrêmes de chaud et de froid, l'exaltation des réactions par les stimulants, l'arrêt des échanges vitaux par les toxiques.

Les recherches que nous avons décrites nous permettent de faire un pas encore, en nous prouvant que tout ce que nous avons constaté ne procède point d'une force vitale inconnaissable et arbitraire, mais de lois immuables, qui régissent également et uniformément les mondes organique et inorganique.

Bibliotecas Centrală Universitară
Secția de Biologie
Cota veche
Don.
Prețul
50 lei

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS ET Cie,
75880 Quai des Grands-Augustins, 55.

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS et Cie

55, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, PARIS (6e)

Envoi dans toute l'Union postale, contre mandat poste ou valeur sur Paris.
Frais de port en sus (Chèques postaux : Paris 29323) R. C. Seine 22520

(Majoration 20 °/o)

ANGLAS (J.), Docteur ès sciences. — **Les phénomènes des Métamorphoses internes.** In-8 (20-13) de 90 pages, avec 16 figures, cartonné. (*C. S.*); 1902..... 4 fr.

BERGONIÉ, Professeur à la Faculté de Médecine de Bordeaux. — **Physique du Physiologiste et de l'Etudiant en Médecine**..... 5 fr.

CAUSSE (X.), Docteur ès sciences, Chef des travaux de Chimie organique à la Faculté de Médecine de l'Université de Lyon. — **De la constitution des alcaloïdes végétaux.** In-8 (25-16); 1899..... 6 fr.

CHATIN (A.), Préparateur chef adjoint du Laboratoire d'Electrothérapie à l'hôpital Saint-Louis, et CARLE (M.), ancien Chef de Clinique des maladies cutanées à la Faculté de Médecine de Lyon. — **Phototérapie. La lumière, agent biologique et thérapeutique** (7 figures)..... 5 fr.

CUÉNOT, Chargé de Cours à la Faculté des Sciences de Nancy. — **L'influence du milieu sur les animaux**..... 5 fr.

— **Les moyens de défense dans la série animale** (42 figures).... 5 fr.

DUCLAUX (J.), Chef de laboratoire à l'Institut Pasteur. — **Les Colloïdes.** (*Ouvrage couronné par l'Académie des Sciences.*) 3e édition mise à jour et augmentée. (*Actualités scientifiques.*) Un volume in-8 avec figures dans le texte; 1925..... 15 fr.

GAUTIER (Armand), Membre de l'Institut. — **La chimie de la cellule vivante.** 2e édition. In-8 (19-12) avec 11 figures, broché..... 5 fr.

KOLTHOFF (I. M.), Conservateur au Laboratoire pharmaceutique de l'Université d'Utrecht. — **La Détermination colorimétrique de la concentration des Ions hydrogène.** (*L'Emploi des Indicateurs colorés.*) Traduit de la 3e édition allemande, avec l'autorisation de l'Auteur, par Edmond VELLINGER. Vol. in-8 de 250 pages, avec tableau; 1926. 50 fr.

BOSE, *Réactions de la Matière vivante.*

**KOPACZEWSKI** (W.), Docteur en Médecine, Docteur ès Sciences, Professeur à l'Institut des Hautes Etudes de Belgique. — **Introduction à l'étude des Colloïdes. Etat colloïdal et ses applications.** Un vol. in-16 (18,5 × 12) de 220 pages, avec 36 figures dans le texte et 2 portraits hors texte; 1926 ..... 16 fr.

**MAZÉ** (P.), Docteur ès sciences, Préparateur à l'Institut Pasteur. — **Évolution du carbone et de l'azote dans le monde vivant.** In-8 (20-13) de 110 pages, cartonné (*C. S.*) ..... 4 fr.

**MILNE-EDWARDS. — Notice sur les travaux physiologiques de Lavoisier.** In-8 (23-14); 1885. (Se vend au profit de l'Association scientifique.) ..... 4 fr.

**OSTWALD** (Wo), Professeur à l'Université de Leipzig. — **Manipulations de Chimie colloïdale,** en collaboration avec P. Wolski et A. Kulm. Traduit de la 4e édition allemande avec la permission de l'auteur, par Edmond Vellinger, Professeur à l'Institut de Chimie de Strasbourg. Un volume in-8° carré (23-14) de 202 pages avec 21 figures; 1924. 10 fr.

**SPALLANZANI** (Lazare). — **Observations et expériences faites sur les animalcules des infusions.** (*Collection des Maitres de la Pensée scientifique.*) Deux volumes in-16 double couronne (180-115) de VIII-106 et 122 pages, broché; 1920 ..... 6 fr.

**TERROINE** (Émile-F.), Maitre de Conférences de Physiologie physico-chimique à l'Ecole des Hautes Etudes (Collège de France). — **Données numériques de Biologie.** *Biochimie, Chimie-physique biologique, Physiologie, Microbiologie. Pharmacodynamie,* publiées sous les auspices de l'Institut Pasteur de Paris, avec *Préface* de E. Roux, Directeur de l'Institut Pasteur, Membre de l'Institut; *Introduction* de M. le Docteur Delezenne, Professeur à l'Institut Pasteur, Membre de l'Académie de Médecine. (Extrait du tome III des Tables Annuelles des Constantes.) In-4 (28-23) de XII-20 pages, cartonné; 1914 ..... 8 fr.

**WEISS** (le Dr), Ingénieur des Ponts et Chaussées, Professeur agrégé à la Faculté de Médecine de Paris. — **Technique d'Electrophysiologie,** avec un avant-propos de M. Gariel (56 fig.) ..... 5 fr.

---

BCU IASI CENTRUL DE LIMBI STRĂINE LIBRARY

# Science & Civilisation

*Collection d'Exposés synthétiques du savoir humain publiée sous la direction de Maurice SOLOVINE*

---

Volumes in-8 couronne (14-19) se vendant séparément

---

**La Collection «Science et Civilisation» forme une bibliothèque de culture générale**

---

*Ouvrages parus :*

Majoration 20 %.

**BEZANÇON (F.)**, Professeur à la Faculté de Médecine de Paris, Membre de l'Académie de Médecine. — **Les bases actuelles du problème de la Tuberculose.** Un vol. de VI-200 pages; 1922..... 7 fr.

**CLOUARD (Henri)**, Homme de Lettres. — **La Poésie française moderne des Romantiques à nos jours**; Un volume de 401 pages; 1924. 15 fr.

**FICHOT (E.)**, Membre de l'Institut, Ingénieur hydrographe en chef de la marine, Membre du Bureau des Longitudes. — **Les Marées et leur utilisation industrielle.** Un vol. de 256 pages; 1923..... 9 fr.

**GRANET (M.)**, Chargé de cours à la Sorbonne, Professeur à l'École des Hautes Études . —**La religion des Chinois.** Un vol. de 204 pages; 1922..... 8 fr.

**JEANSELME (E.)**, Professeur à la Faculté de Médecine de Paris, Membre de l'Académie de Médecine. — **La Syphilis. Son aspect pathologique et social.** Un volume de VII-405 pages avec figures; 1925..... 18 fr.

**LHERMITTE (J.)**, Professeur agrégé de psychiatrie à la Faculté de Médecine de Paris. — **Les fondements biologiques de la Psychologie.** Un volume de 242 pages; 1925..... 14 fr.

BCU LAUSANNE CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

**ROUSSY** (G,), Professeur à la Faculté de Médecine de Paris, Médecin de l'Hospice Paul Brousse. — **L'état actuel du Problème du Cancer.** Un vol. de 192 pages avec 20 fig.; 1924..... 10 fr.

**THIRRING** (H.), Professeur de Physique théorique à l'Université de Vienne. — **L'Idée de la Théorie de la Relativité**; Traduit de l'allemand par M. SOLOVINE. Un vol. de x-186 p., avec 8 fig.; 1923. 8 fr.

**THOMSON** (J.-J.), Professeur de Physique expérimentale à l'Université de Cambridge, Membre de la Société royale de Londres. — **Electricité et Matière.** Traduit de l'anglais par M. SOLOVINE. Préface de M. Paul LANGEVIN. Un volume de x-136 pages, 19 figures avec un portrait de l'auteur; 1922..... 6 fr. 50

**THOULET** (J.), Professeur honoraire à la Faculté des Sciences de Nancy. — **L'Océanographie.** Un vol. de x-288 p. avec 8 figures; 1922.. 9 fr.

**URBAIN** (G.), Membre de l'Institut, Président de la Commission internationale des Eléments chimiques. — **Les Notions fondamentales d'Élément chimique et d'Atome.** Un vol. de 11-172 pages, avec 14 fig. et un tableau; 1925 ..... 10 fr.

*Paraîtront successivement*

**BEZANÇON** (F.), Professeur à la Faculté de Médecine de Paris, Membre de l'Académie de Médecine. — **La Bactériologie.**

**SOLOVINE** (M.), — **L'évolution des problèmes philosophiques dans la Grèce antique.**

**MEILLET** (A), Professeur de grammaire comparée au Collège de France, Directeur à l'Ecole des Hautes Etudes. — **Théorie du Vocabulaire**

**ARRHENIUS** (Svante), Directeur de l'Institut Nobel de l'Académie des Sciences, Correspondant de l'Institut de France. — **L'origine et la fin du Monde. Récentes recherches et hypothèses.**

75880-26. — Paris, Imp. Gauthier-Villars et Cie, 55 quai des Grands-Augustins

BCU AS / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

BCU IASI / CENTRAL UNIVERSITY LIBRARY

# LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS ET Cie

55, QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, PARIS (6e)

Envoi dans toute l'Union postale contre mandat-poste ou valeur sur Paris.
Frais de port en sus. Chèques postaux : Paris 29 323. R. C. Seine 22 520.

Majoration 20 %.

COSTANTIN. — L'Hérédité acquise, ses conséquences horticoles, agricoles et médicales. In-8 (20-13) de 86 pages (*C. S.*); 1901 . . . . 4 fr.

DUTROCHET (René). — Les mouvements des végétaux. Du réveil et du sommeil des plantes. (*Collection des Maîtres de la Pensée Scientifique*). Un volume in-16 double-cour. de VIII-121 p., avec 26 figures; 1921 . . . . . 3 fr.

GRIFFON (Ed.), Ingénieur agronome, Docteur ès Sciences. — L'Assimilation chlorophyllienne et la structure des plantes. Vol. in-8 (20-13) de 106 pages, avec 34 fig. dans le texte (*C. S.*); 1900. Cartonné. . 4 fr.

LOEB (Jacques), Membre de l'Institut Rockfeller pour les recherches médicales. — Les Bases physico-chimiques de la Régénération. Traduit de l'anglais par H. Mouton. Volume in-8 (22-14) de 172 pages, avec 115 figures; 1925 . . . . . 30 fr.

MARIOTTE (Edme). — Discours de la nature de l'air. De la végétation des plantes. Nouvelle découverte touchant la vue. (*Collection des Maîtres de la pensée scientifique*). Un vol. in-16 double couronne (180-115) de XV-120 pages; 1925 . . . . . 3 fr.

MENDELSSOHN (M.). — Les Phénomènes électriques chez les êtres vivants. In-8 (20-13) de 99 pages, avec 16 figures, Cartonné (*C. S.*); 1922 . . . . . 4 fr.

RODET (J.), Ingénieur des Arts et Manufactures. — Actions physiologiques et dangers des courants électriques. In-8 (25-16) de IV-88 p., avec 7 figures; 1917 . . . . . 6 fr. 50

SPALLANZANI (Lazare). — Observations et expériences faites sur les animalcules des infusions. (*Collection des Maîtres de la Pensée Scientifiques.*) Deux volumes in-16 double-couronne (180-115) de VIII-106 et 122 pages, se vendant ensemble; brochés . . . . . 6 fr.


75830-26. Paris. — Imp. Gauthier-Villars et Cie, 55, Quai des Grands-Augustins.